საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მიხეილ ჯღამაძე

წრფივი გარდასახვების საფუძველზე სატელეკომუნიკაციო სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდების დამუშავება და გამოკვლევა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა “ტელეკომუნიკაცია” შიფრი 0402

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
თბილისი, 0175, საქართველო
დეკემბერი, 2014 წ.

თბილისი
2014 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემორე ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით მიხეილ ჯღამაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „წრფივი გარდასახვის საფუძველზე სატელეკომუნიკაციო სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდების დამუშავება და გამოკვლევა“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქარველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის დატელეკომუნიკაციის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

თარიღი ________________

ხელმძღვანელი:	პროფესორი	ჯ. ხუნწარია
რეცენზენტი:	პროფესორი	კ. კამკამიძე
რეცენზენტი:	პროფესორი	ნ. აბზიანიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
2014 წელი

ავტორი :	ჯღამაძე მიხეილი
დასახელება :	წრფივი გარდასახვის საფუძველზე სატელეკომუნიკაციო სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდების დამუშავება და გამოკვლევა
ფაკულტეტი :	ენერგეტიკის და ტელეკომუნიკაციის
აკადემიური ხარისხი:	დოქტორი
სხდომა ჩატარდა:	"__" __________, 2015 წ.

რეზიუმე

სამუშაოში წარმოდგენილია სადისერტაციო თემასთან “წრფივი გარდასახვების საფუძველზე სატელეკომუნიკაციო სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდების დამუშავება და გამოკვლევა” დაკავშირებით ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები.

სხვადასხვა კლასის (ძალიან მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობის) გამოსახულებათა ფართოზოლოვანი სიგნალების დამახსოვრებისა და რეალური სატელეკომუნიკაციო არხებით მათი მაღალხარისხოვანი გადაცემის უზრუნველყოფისათვის აუცილებელია ამ სიგნალების კომპაქტური კოდირების განხორციელება, რისთვისაც შესაძლებელია გამოყენებული იყოს კოდირების სხვადასხვა მეთოდები.

გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების (კომპრესიის) საერთაშორისო JPEG (Joint Picture Exspert Group) და MPEG (Motion Picture Exspert Group) სტანდარტებით რეკომენდირებული დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების კომპრესია შეიძლება განხორციელდეს ეგრეთ წოდებული ბლოკური და ზონური კოდირების ალგორითმების გამოყენებით ფერად გამოსახულებათა სამივე (სიკაშკაშისა და ორი ფერსხვაობითი) შემდგენისათვის.

გამოსახულებათა სიგნალების კომპაქტური კოდირების შემოთავაზებული ბლოკური მეთოდის გამოყენებისას კომპრესიის თვალსაზრისით მისი ეფექტურობა დასტურდება მხოლოდ ძალიან მცირე, მცირე და საშუალო დეტალობით გამორჩეული გამოსახულებებისათვის კომპრესიის არსებულ მეთოდთან შედარებით, რომელიც გათვალისწინებულია საერთაშორისო სტანდარტებით.

კომპრესიის მაჩვენებლების გაზრდა ოთხივე კლასის გამოსახულებებისათვის შესაძლებელი აღმოჩნდა ეგრეთ წოდებული ზონური მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში, რომელიც ემყარება 256x256 ფორმატის ფერად საცდელ გამოსახულებათა სიგნალების სიკაშკაშისა და ფერსხვაობითი შემდგენების წრფივი დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების სტატისტიკურ პარამეტრებს.

უმრავლეს შემთხვევაში დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების არანულოვანი კოეფიციენტები, მათი 8x8 ფორმატით წარმოდგენის დროს, თავმოყრილია ზედა მარცხენა ნაწილში, რაც უმრავლეს შემთხვევაში იძლევა მცირე რაოდენობის ზონების გამოყენებისა და, შესაბამისად, კომპრესიის გაუმჯობესების საშუალებას დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის რეალიზაციის შემდეგ დამატებითი დანაკარგების გარეშე.

კომპრესიის ფაქტორის უფრო მეტად გაუმჯობესება შესაძლებელია ზონური კოდირების მეთოდში ტრანსფორმანტების სკანირების ალგორითმის ადაპტაციით, კერძოდ მთავარი კოეფიციენტების მასივში მათი სკანირების გარეშე და სკანირების ოთხიდან ერთ-ერთი (ზიგზაგ-ჰორიზონტალური, ზიგზაგ-ვერტიკალური, ჰორიზონტალური და ვერტიკალური) ვარიანტით კოდირებისას, ხოლო არამთავარი კოეფიციენტების მასივებისათვის სკანირების ორიდან ერთ-ერთი (ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური) ვარიანტის გამოყენებისას და, აგრეთვე, მთავარი კოეფიციენტების

ორგანზომილებიან მასივში მათი სხვაობების გამოთვლის ორიდან ერთ-ერთის (ჰორიზონტალური და ვერტიკალური) ვარიანტის რეალიზაციის შემთხვევაში. აღნიშნული ვარიანტებიდან კომპრესიის თვალსაზრისით საუკეთესოს შერჩევის საშუალებით შესაძლებელი აღმოჩნდა კომპრესიის ფაქტორის საგრძნობი გაზრდა კომპრესიის არსებულ მეთოდთან შედარებით.

კომპრესიის შემოთავაზებული ადაპტური მეთოდი მოითხოვს საინფორმაციო დამატებითი (ჭარბი) სიმბოლოების შეტანას შესაბამის ციფრულ ნაკადში. მასთან კი დაკავშირებულია აღდგენილი გამოსახულებების ხარისხის გაუარესება, რაც მოითხოვს ციფრულ სიგნალში საინფორმაციო სიმბოლოების რამდენჯერმე (მაგალითად, სამჯერ) დაფიქსირებას.

სხვადასხვა (ძალიან მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობის მქონე) კლასის საცდელი ფერადი გამოსახულებების კომპაქტური კოდირების შემოთავაზებული მეთოდების მოდელირებისათვის გამოყენებულია პროგრამა Mathcad, რომლის საფუძველზე შეფასებულია შემოთავაზებული მეთოდების არა მარტო ეფექტურობა არსებულთან შედარებით, არამედ აღდგენილი გამოსახულებების ხარისხობრივი მაჩვენებლები ობიექტური და სუბიექტური კრიტერიუმების საფუძველზე.

Abstract

Work offers the results of theoretical and experimental researches conducted in relation with the dissertation work: "Development and Study of the Methods of Telecommunication Signals' Compact Coding on the Basis of Linear Transformation:

To ensure saving of the wide-band signals of images of different classes (very low, low, medium and high detailing) and their high quality transmission by actual telecommunication channels, compact encoding of the signals is necessary and various encoding methods could be used for this.

Compression of the transforms of discrete cosine transformation, recommended by International JPEG (Joint Picture Expert Group) and MPEG (Motion Picture Expert Group) standards of image compact coding (compression) can be provided using so called block and zone encoding algorithms for all three components (brightness and two color ranges) of colored images.

In case of use of offered block method of compact coding of the image signals, its effectiveness, with respect of compression, is evidenced for the pictures distinguished with very low, low and medium detailing, compared with the existing compression method provided for by the international standards.

Improvement of compression characteristics for the images of all four classes was possible in case of use of so called zoning method, based on statistical parameters of the coefficients of the transforms of linear discrete cosine transformation of the brightness and color ranges of the colored test image signals of 256x256 format.

In the most cases, coefficients of the transforms of discrete cosine transformation different from zero, in case of their presentation in 8x8 format , is gathered in the upper left part, allowing, in the most cases, use of the small number of zones and hence, improving of compression, after discrete cosine transformation, without additional losses.

Further improvement of the compression factor is possible through adaptation of the algorithm of transforms scanning in the zoned coding method, in particular, through coding in the array of the main coefficients, without scanning and one of four scanning (zigzag-horizontal, zigzag-vertical, horizontal and vertical) variants and in case of use one of the two variants of scanning (zigzag-horizontal and zigzag-vertical) for the arrays of non-main coefficients and, in case of realization of on one of two (horizontal and vertical) variants of calculation of the differences in two-dimensional array of the main coefficients. It turned out that through selection of the best ones, with respect of compression, among the mentioned variants, it is possible to significantly increase compression factor, compared with the existing compression methods.

Offered adaptive compression method requires inclusion of the additional (excessive) information characters into the relevant digital flow. With this, worsening of the restored picture quality is associated, requiring fixing of the information characters in the digital signal several (e.g. three) times.

Methcad software was used for modeling of the offered techniques of compact coding of the test colored images of various classes (very low, low, medium and high detailing), allowing evaluation of not only its effectiveness, compared with the existing techniques, but also evaluation of the qualitative characteristics of the restored picture, on the basis of the objective and subjective criteria.

სარჩევი

ცხრილების ნუსხა

ნახაზებისა და სურათების ნუსხა

გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა

აბრევიატურა	განმარტება	
JPEG	Joint Picture Expert Group	უძრავ გამოსახულებათა ექსპერტთა ჯგუფი
ISO	International Organization for Standartization	სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია
IEC	International Electrotechnical Commission	საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისია
MPEG	Motion Picture Exspert Group	მოძრავ გამოსახულებათა ექსპერტთა ჯგუფი
MPEG-1; 2; 4	Motion Picture Exspert Group-1; 2; 4	მოძრავ გამოსახულებათა კოდირების სტანდარტები
ESA	European Space Agency	ევროპის კოსმოსური სააგენტო
IPTV	Internet Protocol Television	ინტერნეტ ტელევიზია
VOD	VideoOnDemand	ვიდეო მოთხოვნით
4G	Fourth Generation	მეოთხე თაობის (გენერაციის) მობილურის ქსელი
LTE	Long Term Evolution	“მრავალწლიანი განვითარება”. მეოთხე თაობის მობილური სისტემა
HD	High Definition	მაღალი სიმკვეთრე, ხარისხი
CDMA	Code Division Multiple Access	“მრავალი შეღწევადობა კოდური დაყოფით” მესამე თაობის მობილური ქსელი
3D	Three Dimensional	სამ განზომილიანი
DCT	Discrete Cosine Transform	დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვა
DVB	Digital Video Broadcasting	ციფრული ვიდეომაუწყებლობა
EOB	End of blok	ბლოკის დასასრული
MSE	Mean square error	საშუალო კვადრატული ცდომილება
NMSE	Normalized mean square error	ნორმირებული საშუალო კვადრატული ცდომილება
SNR	Signal and Noise ratio	სიგნალისა და ხმაურის ფარდობა
SNRP	Signal and Noise ratio of the peak value	სიგნალისა და ხმაურის ფარდობის პიკური მნიშვნელობა

შესავალი

თანამედროვე გლობალიზაციის პირობებში ადამიანის, საზოგადოების, ქვეყნებისა და ზოგადად მსოფლიოს განვითარებაში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ინფორმაციის მუდმივ განახლებას (მიღება, დამუშავება, შენახვა, გადაცემა). ადამიანის სენსორულ სისტემებს შორის დომინანტული ადგილი უკავია მხედველობის სისტემას. ინფორმაციის დაახლოებით 80% სწორედ მხედველობის საშუალებით მიეწოდება ადამიანს.

გამოსახულებათა (მათ შორის ტელეხედვის) სიგნალების ციფრული სისტემების შექმნაზე პირველი წინადადებები გამოჩნდა გასული საუკუნის 80-90-იან წლებში. ამ პროექტებს საფუძვლად ედო ის წარმატებები, რომლებიც მიღწეული იქნა გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირებისა და შეკუმშვის მეთოდების დამუშავებაში. ამ სფეროში სამუშაოები ტარდებოდა არა მხოლოდ ციფრული სატელევიზიო სისტემების შექმნის, არამედ ვიდესატელეფონო, ვიდეოსაკონფერენციო, ციფრულ ლაზერულ კომპაქტ-დისკებზე ვიდეოპროგრამების ჩაწერის, კომპიუტერული გრაფიკის, მულტიმედიის ვიდეოსაშუალებებისა და სხვა სისტემების შექმნის მიზნით.

ყოველწლიურად იზრდებოდა გამოსახულებათა ციფრული გადა-ცემის სისტემების პროექტების რაოდენობა და უმჯობესდებოდა მათი მახასიათებლები. 1993 წლის დასაწყისში განხილვიდან უკვე მოიხსნა უკანასკნელი ანალოგური სისტემები. 1993 წლის მაისში არსებითად მსგავსი პროექტების წარმომდგენი კომპანიებისა და ორგანიზაციების ოთხი ჯგუფი გაერთიანდა “Grand Alliance”-ში. მათ შემდგომში წარმოად-გინეს ერთიანი პროექტი, რომელიც ამერიკის შეერთებულ შტატებში გახდა სრულად ციფრული სატელევიზიო სისტემის სტანდარტის საფუ-ძველი. ახალი სისტემის შემქმნელთა შორისაა მასაჩუსეტსის ტექნოლო-გიური ინსტიტუტი, კორპორაციები Zenith, AT&T, General Instruments, Philips-ისა და Thomson-ის ამერიკული განყოფილებები და სხვა.

ჩატარებულ სამუშაოთა შედეგებმა გამოყენება ჰპოვა რამდენიმე სტანდარტში. უძრავი გამოსახულებების შეკუმშვისათვის ფართოდ გამოიყენება JPEG (Joint Picture Expert Group) რეკომენდაცია [1].

JPEG წარმოადგენს ფერადი, უძრავი გამოსახულების სტანდარტს. იგი შეიქმნა 1986 წელს და ითვალისწინებდა სტატიკური გამოსახულების გამოკვლევას და ფორმატში ჩაწერილი გამოსახულების მოცულობის შემჭიდროებას დანაკარგების გარეშე. მიღებული სტანდარტი დამტკიცდა როგორც ISO/IEC 10918-1, ხოლო უფრო მარტივ და მოსახერხებელ ფორმაში დაერქვა JPEG სტანდარტი.

მოძრავ გამოსახულებათა და ხმოვანი თანხლების სიგნალების შეკუმშვის მეთოდები აღწერილია რეკომენდაციებში MPEG-1 და MPEG-2 (MPEG–Motion Picture Expert Group). სტანდარტი MPEG-1, რომელიც საბოლოოდ დამტკიცდა 1993 წლის დეკემბერში, ძირითადად ორიენტირებულია კინოფილმებისა და ვიდეოპროგრამების ჩაწერაზე ლაზერულ კომპაქტურ დისკებზე, რომლის დროსაც შესაძლებელია გამოსახულებისა და ხმის აღწარმოება ჩვეულებრივ პერსონალურ კომპიუტერზე. სტანდარტი MPEG-2, რომელიც განკუთვნილია როგორც გამოსახულებათა განშლის ჩვეულებრივი სტანდარტის, ასევე მაღალი სიმკვეთრის (გარჩევადობის) სატელევიზიო მაუწყებლობის სისტემებისათვის, დამტკიცდა 1994 წლის ნოემბერში [2, 3, 4].

დღეისათვის ციფრული ტელეხედვის სისტემები, რომლებიც ემყარება სატელევიზიო სიგნალების შეკუმშვას MPEG-2 სტანდარტით, ფართოდ ვრცელდება მრავალ ქვეყანაში. ამასთან ერთად, უპირველეს ყოვლისა, წყდება ჩვეულებრივი გარჩევადობის ტელეხედვის გადასაცემი პროგრამების რაოდენობის მნიშვნელოვანი გაზრდის ამოცანა, ვინაიდან ეს იძლევა მნიშვნელოვან კომერციულ ეფექტს.

ჯერ კიდევ 1993 წელს ევროპაში, როგორც კი ცხადი გახდა, რომ მომავალი აქვს ციფრულ სატელევიზიო სისტემებს, მიიღეს პროექტი DVB (Digital Video Broadcasting – ციფრული ვიდეომაუწყებლობა), რომლის დამუშავებაში მონაწილეობა მიიღო სხვადასხვა ქვეყნის 130-ზე მეტმა ფირმამ და სამეცნიერო-კვლევითმა ორგანიზაციამ. უკვე 1994 წელს ABC World News Now იყო პირველი სატელევიზიო შოუ, რომელიც გადაიცა ინტერნეტით [5, 6].

1987 წლიდან ევროპის გაერთიანებულმა კოსმოსურმა სააგენტომ ESA (European Space Agency), რომელშიც შედიოდნენ დიდი ბრიტანეთი, საფრანგეთი, ფინეთი, გერმანიის ფედერაციული რესპუბლიკა, ჰოლან-

დია, იტალია, უნგრეთი და აგრეთვე კანადა), შეიმუშავა კონცეფცია და მომდევნო ათწლეულის სტრატეგიულ მიმართულებად დასახა დედამი-წის ხელოვნური თანამგზავრის საშუალებით ციფრული სიგნალების, მათ შორის ციფრული ტელეხედვის გადაცემა. უკვე 1997 წელს დედამიწის ხელოვნური თანამგზავრით ევროპულ ქვეყნებში გადაიცემო-და ციფრული ტელეხედვის 170 არხი, ხოლო 1998 წლის ბოლოსათვის ასეთი არხების რაოდენობამ გადააჭარბა 1000-ს. ამავდროულად ვითარ-დება როგორც ციფრული სატელევიზიო მაუწყებლობა საკაბელო ხაზე-ბით, ასევე ციფრული ვიდეოჩაწერა და ციფრული ვიდეოდისკები [7].

როგორც ზემოაღნიშნულიდან ჩანს, დღევანდელ საინფორმაციო სამყაროში სულ უფრო მეტ ადგილს იკავებს ციფრული გამოსახულება. ტექნოლოგიების განვითარებამ, თავის მხრივ, გამოიწვია ციფრული ინტერაქტიური ტელევიზიის (IPTV, VideoOnDemand, და სხვა), ინტერნეტის და მობილური სატელეფონო კავშირის მეოთხე თაობის (გენერაციის) 4G, LTE, CDMA და აგრეთვე უძრავი და მოძრავი გამოსახულებების გადაცემის ეგრეთწოდებული 3D (სამგანზომილიანი გამოსახულება) სისტემებით გამოსახულებათა გადაცემის მეთოდების დანერგვის აუცილებლობა.

საქართველოში უკვე გამოიყენება და სულ უფრო მეტი სატელე-კომუნიკაციო კომპანია ნერგავს თავის ქსელში ინტერაქტიურ ტელევი-ზიას (IPTV, VideoOnDemand და სხვა). ამასთან ერთად კომპანიები ცდილობენ მომხმარებელს მიაწოდოს რაც შეიძლება მეტი HD არხი.

საქართველოს კომუნიკაციების ეროვნული კომისიისა და ეკონო-მიკის სამინისტროს გადაწყვეტილებით 2015 წლის ივნისისათვის ანა-ლოგური სატელევიზიო მაუწყებლობა უნდა შეიცვალოს ციფრული მაუ-წყებლობით DVB-T2 სისტემისა და MPEG-4 სტანდარტის გამოყენებით [8].

ციფრულ მაუწყებლობაზე გადასვლისას სატელევიზიო არხები დაჯგუფდება და ისინი მულტიპლექსების მეშვეობით DVB-T2 (ციფრული ვიდეო მაუწყებლობა – მიწისზედა მაუწყებლობის მეორე თაობა) სისტემის გამოყენებით გავრცელდება, რომელშიც გათვალისწინებულია გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების (კომპრესიის) MPEG-4 სტანდარტი. მულტიპლექსი ციფრული ინფორმაციის ნაკადია, რომელიც

გამოსახულების, ხმისა და სხვა სახის მონაცემის ერთობას წარმოადგენს. ერთი მულტიპლექსის საშუალებით შესაძლებელია 15 სტანდარტული ან 7 მაღალი გარჩევადობის ხარისხის სატელევიზიო სიგნალის გადაცემა [8, 9].

ციფრულ მაუწყებელობაზე გადასვლის შემდეგ საქართველოში ანალოგიური მაუწყებლობისთვის ამჟამად გამოყენებული სიხშირეთა ზოლის ნაწილი გამონთავისუფლდება და გამოყენებული იქნება სხვა სერვისების მისაწოდებლად. მაგალითად, სიხშირეთა 800 მჰც ზოლი გამოყენებული იქნება მობილური ფართოზოლოვანი LTE ტექნოლოგი-ისათვის, რომელიც ამჟამად მიიჩნევა ყველაზე პესპექტიულ ტექნოლო-გიად. მისი საშუალებით შესაძლებელია მთელი ქვეყნის მასშტაბით მაღალსიჩქარიან მონაცემთა გადაცემის ქსელის (ინტერნეტი, ლოკალუ-რი შიდა ქსელი, მონაცემთა ერთიანი ბაზის ქსელი და სხვა) აგება [8].

ახალი თაობის სატელევიზიო სისტემების მთავარი თავისებურებებია:

– ციფრული სატელევიზიო სიგნალის სიხშირული ზოლის არსებითი შევიწროვება, რაც მიიღწევა კომპაქტური (ეფექტური) კოდირების, ანუ გამოსახულებებში სიჭარბის შემცირების, საშუალებით, რაც იძლევა უფრო მეტი სიგნალის გატარების საშუალებას, ვიდრე ერთი ანალოგიური სიგნალის გადაცემა იმავე სიხშირულ ზოლში, კერძოდ, დაახლოებით 15 სტანდარტული პროგრამის გადაცემის საშუალებას სიხშირეთა იმ არხში, რომელიც ამჟამად გამოიყენება მხოლოდ ერთი ანალოგური სიგნალის გადასაცემად [9];

– კავშირის ციფრული ქსელებით გადაცემისას ინფორმაციის სხვა სახეობებთან ინტეგრაცია;

– გადასაცემი სატელევიზიო პროგრამებისა და სხვა ინფორმაციის არასანქცირებული მიღებისაგან (მოპოვებისაგან) დაცვის უზრუნველყოფა, რაც იძლევა ფასიანი სატელევიზიო მაუწყებლობის სისტემის შექმნის საშუალებას;

– ინტერაქტიური ტელევიზიის ფორმატის დამკვიდრება, რაც იძლევა სტატისტიკური მონაცემების (არხებისა და კონკრეტული გადაცემების რეიტინგი, მომხმარებელთა აქტივობის პერიოდის დადგენა და სხვა) მიღებისა და მათი შემდგომი დამუშავების საშუალებას;

– არხებზე ტელეტექსტის (მომხმარებლის ანგარიშის ბალანსი, ამინდის პროგნოზი, ვალუტის კურსი, გადაცემათა ჩამონათვალი, დღის მთავარი სიიახლეების მოკლე მიმოხილვა და სხვა) დამატება.

გამოსახულებათა სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდებს, რომლებიც დამყარებულია სხვადასხვა წრფივ გარდასახვებზე და მათთვის შესაბამისად კოდირების სხვადასხვა მეთოდების შერჩევაზე, ეძღვნება მრავალი სამეცნიერო შრომა.

უნდა აღინიშნოს, რომ JPEG ითვალისწინებს ფერადი გამოსახულების წარმოდგენას სიკაშკაშის Y და ორ ფერსხვაობით C_b და C_r შემდგენებად და გამოსახულების თითოეული მათგანის დაყოფას 8x8 ან 16x16 ზომის ბლოკებად, რომლებიც შემდგომში ცალ-ცალკე მუშავდება დისკრეტული კოსინუსური წრფივი გარდასახვის (DCT) საბაზო მატრიცების გამოყენებით.

ცნობილია, რომ ადამიანის თვალი უფრო მეტად რეაგირებს სიკაშკაშის ცვლილებაზე ვიდრე ფერებისაზე. ამიტომ სტანდარტი ითვალისწინებს ფერსხვაობითი მდგენელების პიქსელების (ელემენტების) რაოდენობის ოთხჯერ შემცირებას გამოსახულების ჰორიზონტალური და ვერტიკალური მიმართულებით ყოველი მეორე ანათვლის ამოგდების მეშვეობით (მიმღებში მათი აღდგენა ხდება ინტერპოლაციის მეთოდის გამოყენებით), ხოლო სიკაშკაშის მდგენელის დამუშავება ხდება სრულად (პიქსელების რაოდენობის შემცირების გარეშე) [10, 11].

აღსანიშნავია, რომ მოძრავ გამოსახულებათა და მისი ხმოვანი თანხლების სიგნალების კომპაქტური კოდირების MPEG კოდერების მთავარ ელემენტს წარმოადგენს კადრს შიგნით კოდირება JPEG რეკომენდაციის საფუძველზე. დანარჩენი კადრები წარმოადგენენ მთავარი კადრის მცირე ცვლილებების მონაცემებზე “დაშენებულ” კადრებს [9, 10, 11, 12, 13].

ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, შეიძლება დავასკვნათ, რომ თუ მივაღწევთ ფერადი უძრავი გამოსახულების კომპრესიის მაჩვენებლის გაზრდას არსებული სტანდარტებით დამუშავებული გამოსახულებების უცვლელი ხარისხობრივი მაჩვენებლების პირობებში,

მაშინ შესაბამისი მეთოდის გამოყენება შეგვეძლება როგორც სტატიკური, ასევე მოძრავი გამოსახულებებისათვის.

თემის აქტუალობა: ვინაიდან თანამედროვე მსოფლიოში დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ინფორმაციის (ტელევიზია, ტექსტური ფაილი, უძრავი და მოძრავი გამოსახულება, მუსიკა, ხმოვანი ინფორმაცია და სხვა) სწრაფ მიღება/დამუშავება/გადაცემას და იზრდება ამ ინფორმაციის შენახვის მოთხოვნა, ამიტომ განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს მის წარმოდგენას კომპაქტურად.

მიუხედავად განვითარების ტემპებისა და ტექნოლოგიების სრულყოფისა, მაინც არსებობს დიდი მოცულობის მონაცემების გადაცემის პრობლემები, რაც დაკავშირებულია სატელეკომუნიკაციო არხების გამტარუნარიანობასა და მახსოვრობის მოწყობილობების ტევადობების შეზღუდულ შესაძლებლობებთან. მათი მუშაობის ხარისხი დიდად არის დამოკიდებული საკომუნიკაციო ქსელის გამტარუნარიანობაზე. ამგვარად, რაც უფრო ნაკლები მოცულობისა და მაღალი ხარისხის ინფორმაცია იქნება გადაცემული, მით უფრო მოქნილი და რენტაბელური იქნება ასეთი ქსელი და, გარდა ამისა, შესაძლებელი იქნება მისი შემდგომი განვითარება (სრულყოფა).

ზემოთ აღნიშნული პრობლემა მოითხოვს ციფრული სიგნალების კომპაქტურად წარმოდგენის მაქსიმალურად სრულყოფილი მეთოდების დამუშავებასა და გამოკვლევას, რის გამოც აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტა ტელეკომუნიკაციის სფეროს ერთ-ერთ აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს.

სამუშაოს მიზანი. სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს შემოთავაზებული ბლოკური და ზონური კოდირების მეთოდების საფუძველზე ფერად გამოსახულებათა კომპრესიის ფაქტორის ამაღლება კომპრესირებულ გამოსახულებათა ხარისხობრივი პარამეტრების გაუარესების გარეშე JPEG და MPEG სტანდარტებით გათვალისწინებული კომპრესიის მეთოდთან შედარებით. სამუშაოს ერთ-ერთ ძირითად მიზანს წარმოადგენს, აგრეთვე, შემოთავაზებული მეთოდებით კოდირებული საცდელი გამოსახულებების კომპაქტური კოდირების პარამეტრების შეფასება და

მათი შედარება JPEG და MPEG რეკომენდაციების საფუძველზე კომპრესირებული გამოსახულებების შესაბამის პარამეტრებთან.

კვლევის ძირითადი ამოცანები. სადისერტაციო სამუშაოს ძირითად ამოცანებია:

1. ფერად გამოსახულებათა შემდგენების კომპრესიის ბლოკური კოდირებისა და დეკოდირების მეთოდების დამუშავება, მათი კომპიუტერული მოდელირება და კომპრესიის გაუმჯობესების შესაძლებლობების დადგენა ძალიან მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობის საცდელი გამოსახულებებისათვის. კომპრესიის შესაბამისი ფაქტორების განსაზღვრა და მათი შედარება არსებული მეთოდით მიღწეულ ანალოგიურ პარამეტრებთან.

2. 256x256 ფორმატის ფერად გამოსახულებათა სიკაშკაშისა და ფერსხვაობითი შემდგენების შესაბამისი 8x8 ზომის ბლოკების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივების სტატისტიკური მახასიათებლების შეფასება.

3. ფერად გამოსახულებათა შემდგენების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის კომპრესიის ზონური მეთოდის ალგორითმის დამუშავება და მისი ეფექტურობის განსაზღვრა.

4. საცდელი გამოსახულებების შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის სტატისტიკური პარამეტრების ანალიზი და მათ საფუძველზე ზონური კოდირების ადაპტური ალგორითმის დამუშავება კომპრესიის ფაქტორის ამაღლების მიზნით.

5. ტრანსფორმანტების ადაპტური ზონური კოდირების მეთოდის რეალიზაციისას ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილების შედგენა ტრანსფორმანტების სტატისტიკური მონაცემების გათვალისწინებით, რომლებიც მისადაგებულია (ოპტიმალურია) მოცემული გამოსახულების სიკაშკაშისა და ფერსხვაობითი შემდგენებისადმი.

6. გამოსახულებათა კომპრესიის ფაქტორის შემდგომი ამაღლების მიზნით ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების სკანირებისათვის, გარდა არსერბული მეთოდისა, ზიგზაგ-ვერტიკალური

სკანირების გამოყენება და აღნიშნული ვარიანტებიდან საუკეთესოს შერჩევა კომპრესიის თვალსაზრისით.

7. ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტური უდანაკარგო კოდირების დამუშავებული მეთოდის შეხამება მთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტურ უდანაკარგო კოდირებასთან.

8. გამოსახულებათა სამივე შემდგენის გარდასახვის კოეფიციენტების შემოთავაზებული ადაპტური ზონური უდანაკარგო კოდირების მეთოდით კომპრესიისას მისი ეფექტურობის შეფასება სხვადასხვა კლასის ფერადი საცდელი გამოსახულებებისათვის.

9. კომპრესიის შემოთავაზებული მეთოდებით კოდირებული გამოსახულებების ხარისხობრივი პარამეტრების დადგენა მათი შეფასების როგორც ობიექტური, ასევე სუბიექტური კრიტერიუმების საფუძველზე.

10. 256x256 ფორმატის ფერად გამოსახულებათა შემდგენების გარდასახვის კოეფიციენტების შემოთავაზებული მეთოდებით კოდირების დამუშავებული მეთოდების მოდელირება პროგრამა Mathcad-ის გამოყენებით და მიღებული შედეგების საფუძველზე შესაბამისი რეკომენდაციების შემუშავება.

გამოკვლევის მეთოდები: სამუშაოში დასმული პრობლემების ანალიზისა და შესაბამისი ამოცანების გადაწყვეტისათვის თეორიული და პრაქტიკული საკითხების დამუშავებისას გამოყენებულია ინფორმაციის თეორია, შემთხვევითი პროცესების თეორია, მატრიცებისა და რიცხვთა თეორია, ალბათობის თეორია და, აგრეთვე, კომპიუტერული მოდელირების მეთოდები პროგრამა MathCad-ის პროგრამული უზრუნველყოფით.

სამეცნიერო სიახლე. ნაშრომის თემასთან დაკავშირებული კვლევის შედეგად მიღწეული სამეცნიერო სიახლეებია:

- ნაჩვენებია ფერად გამოსახულებათა სიკაშკაშისა და ფერსხვაობითი შემდგენების 8x8 ფორმატის ბლოკების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის საფუძველზე გამოთვლილი დაკვანტული კოეფიციენტების კომპრესიის მაჩვენებლის გაუმჯობესების შესაძლებლობა გარდასახვის კოეფიციენტების JPEG და MPEG სტანდარტებით გათვალისწინებულ კოდირებასთან შედარებით;

- შემუშავებულია გამოსახულებათა შემდგენების გარდასახვის კოეფიციენტების კომპაქტური უდანაკარგო კოდირების (კომპრესიის) ბლოკური მეთოდი და დაგენილია მისი ეფექტურობის პარამეტრები სხვადასხვა კლასის ფერადი გამოსახულების შემდგენებისათვის;

- შემუშავებულია გამოსახულებათა შემდგენების შესაბამისი დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის კომპაქტური უდანაკარგო კოდირების (კომპრესიის) ზონური მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს, აგრეთვე, კონკრეტული გამოსახულების შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების სტატისტიკის საფუძველზე ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილების გამოყენებას;

- შედგენილია გარდასახვის დაკვანტული არამთავარი კოეფიციენტების უდანაკარგო კოდირებისათვის რეალური გამოსახულებებისადმი მისადაგებული ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილები აღნიშნული კოეფიციენტების მასივის სტატისტიკის გათვალისწინებით;

- შემუშავებული და გამოკვლეულია დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტური ზონური კოდირების მთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტურ კოდირებასთან შეხამების ალგორითმი, რამაც უზრუნველყო კომპრესიის ფაქტორის შემდგომი გაუმჯობესება;

- ნაჩვენებია, რომ კომპაქტური ადაპტური კოდირების შემოთავაზებული მეთოდები უზრუნველყოფენ ფერად გამოსახულებათა თითოეული შემდგენის კომპრესიის ეფექტურობის გაზრდას კოდირების არსებულ მეთოდთან შედარებით გამოსახულებათა აღდგენის უცვლელი ხარისხობრივი მაჩვენებლების პირობებში.

სამუშაოს პრაქტიკული ღირებულება განპირობებულია იმ ფაქტით, რომ სატელეკომუნიკაციო სფეროში მიმდინარეობს სწრაფი განვითარების პროცესები, რაც გულისხმობს როგორც მოძრავი, ისე უძრავი გამოსახულებების გადაცემას მაღალი ხარისხით და მცირე მოცულობით. გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების არსებული მეთოდის შესწავლა, ანალიზი და მათ საფუძველზე დამუშავებული მეთოდების დანერგვა საშუალებას მისცემს სატელეკომუნიკაციო

სისტემების ინტეგრატორებს, მოთხოვნის შესაბამისად, ზუსტად შეარჩიონ პროდუქტი, რომლის დანერგვასაც აპირებენ.

ნაშრომი შეიცავს ყველა აუცილებელ მონაცემს, მეთოდიკასა და რეკომენდაციას სატელეკომუნიკაციო და მახსოვრობის სისტემებისათვის გამოსახულებათა სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდების რეალიზაციისათვის და, აგრეთვე, შესაბამის კომპიუტერულ პროგრამებს ტელეკომუნიკაციის სპეციალობის ბაკალავრიატსა და მაგისტრატურაში შესაბამისი სასწავლო კურსების ლაბორატორიულ-პრაქტიკული მეცადინეობების კომპიუტერული მოდელირებით ჩატარებისათვის.

სამუშაოს აპრობაცია. ნაშრომში მიღებული კვლევების შედეგები ასახულია ქ. ქუთაისში საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის “ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები” მოხსენებათა კრებულში გამოქვეყნებულ 2 სტატიაში (21-22. V. 2010 წ.), საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის “ახალი ტექნოლოგიები თანამედროვე მრეწველობაში” (29-30. IV. 2010 წ. თბილისი) შრომების კრებულში გამოქვეყნებულ 1 სტატიაში, საერთაშორისო საინჟინრო აკადემიისა და საქართველოს საინჟინრო აკადემიის სამეცნიერო ჟურნალში “Georgian Engineering News” (3, 2011 წ. თბილისი) გამოქვეყნებულ 1 სტატიაში, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო-რეფერირებული ჟურნალში “მეცნიერება და ტექნოლოგიები” (№10-12, თბილისი, 2011) გამოქვეყნებულ 1 სტატიაში, საერთაშორისო საინჟინრო აკადემიისა და საქართველოს საინჟინრო აკადემიის სამეცნიერო ჟურნალში “Georgian Engineering News” (2, 2012 წ. თბილისი) გამოქვეყნებულ 1 სტატიაში და საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჯურნალი “განათლება”-ში (№1(4), თბილისი 2012 წ.) გამოქვეყნებულ 1 სტატიაში.

სამუშაოს სტრუქტურა. სამუშაო შედგება შესავლისაგან, ლიტერატურის მიმოხილვისაგან, შედეგებისა და მათი განსჯისაგან, ოთხი თავისაგან, დასკვნისაგან, გამოყენებული ლიტერატურისაგან და დანართებისაგან. სამუშაოს მოცულობა შეადგენს 166 გვერდს, რომელთა შორის 96 გვერდი ძირითადი ტექსტია 13 ნახაზითა და 35 ცხრილით. გამოყენებული ლიტერატურა შეიცავს 54 დასახელებას.

ლიტერატურის მიმოხილვა

ნებისმიერი ანალოგიური სიგნალის (გამოსახულება, ხმა) ციფრულ სიგნალად გარდასაქმნელად საჭიროა სამი ეტაპის გავლა: დისკრეტიზაცია, დაკვანტვა და კოდირება. მათგან ყველაზე აქტუალური და მნიშვნელოვანია სიგნალების კოდირება, რომელიც ძირითად გავლენას ახდენს სიგნალის მოცულობაზე და ხარისხზე.

არსებობს მრავალი მეთოდი სიგნალების ციფრულ კოდირებასთან დაკავშირებით, რომელზეც შექმნილია მთელი რიგი სამეცნიერო სამუშაოები. მათგან ყველაზე საინტერესოს წარმოადგენს გამოსახულებათა სიგნალების ციფრული კოდირება [14].

გამოსახულებათა სიგნალების ციფრული კოდირების დღეისათვის არსებული მრავალი მეთოდიდან შედარებით გავრცელებულს წარმოადგენს: იპულსურ-კოდური მოდულაცია (იკმ); წინასწარმეტყველე-ბითი კოდირება, კერძოდ კი დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაცია (დიკმ); სტატისტიკური (უდანაკარგო) კოდირება; ვექტორული დაკვანტვა; ადაპტური ჯგუფური კოდირება; პირამიდული კოდირება; კოდირება წრფივი გარდასახვების საფუძველზე; კოდირება სხვადასხვა მეთოდების შეხამებით (ადაპტური კოდირება) და სხვა.

გამოსახულებათა სიგნალების ეფექტური კოდირება ფაქტიურად გულისხმობს საწყისი დისკრეტული სიგნალის ისეთ გარდაქმნას, რომ შეტყობინების ერთ დისკრეტულ ანათვალზე მოსული ორობითი სიმბო-ლოების (ბიტების) საშუალო რაოდენობა დაყვანილ იქნას მინიმუმამდე, ე.ი ამ შეტყობინებების ენტროპიის მნიშვნელობამდე, რაც ძნელად გადასაწყვეტი პრობლემაა, რადგან იგი მოითხოვს საწყის სიგნალში არსებული სტატისტიკური სიჭარბის სრულად აღმოფხვრას [15, 16].

კოდირების ყველა მეთოდი საბოლოო ჯამში ამცირებს ორი სახის სიჭარბეს:

1. სტატისტიკური სიჭარბე, რომელიც განპირობებულია გამოსახულელების ელემენტების სტატისტიკით;
2. ფსიქოფიზიოლოგიური სიჭარბე, რომელიც დაკავშირებულია ადამიანის მხედველობითი აღქმის თავისებურებებთან. მხედველობითი ინფორმაცია გროვდება მხედველობით

გრძელვადიან მეხსიერებაში, იქმნება რეალური ობიექტებისადმი მეტნაკლებად მიმსგავსებული სუბიექტური წარმოდგენები, რომლებიც გამოიყენება შემდგომი მოქმედებისა და აზროვნების საფუძვლად.

გამოსახულებათა სიგნალების ციფრული კოდირების შეფასების ძირითად პარამეტრებია:

1. კომპრესიის კოეფიციენტი C, რომელიც წარმოადგენს გამოსახულების საწყისი სიგნალის ერთ ელემენტზე (დისკრეტულ ანათვალზე) დახარჯული ბიტების რაოდენობის (M_1) შეფარდებას ეფექტური კოდირების შემდეგ ერთი ელემენტისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობასთან (M_2) [17, 18, 19].

2. ეფექტური კოდირების შემდეგ აღგენილი გამოსახულების ხარისხის ობიქტური (საშუალო კვადრატული და ნორმირებული საშუალო კვადრატული შეცდომები და სხვა) და სუბიექტური (ადამიანის ფსიქოფიზიოლოგური აღქმის თავისებურებანი) შეფასების შედეგები.

3. კოდირებული სიგნალის ხელშეშლამდგრადობა.

4. ეფექტური კოდირების რეალიზაციის სიმარტივე, რომელიც შეიძლება დახასიათდეს შესასრულებელი ოპერაციების რაოდენობით, გამოსაყენებელი აპარატურის სიმარტივით და გაბარიტებით, აგრეთვე დასამუშავებელი სიგნალის დაყოვნების დროით.

იპულსურ-კოდური მოდულაცია სიგნალის კოდირების ყველაზე გავრცელებული მეთოდია. სიგნალის კოდირების ზემოთ მოყვანილი მეთოდებიდან იგი ყველაზე მეტად შეესაბამება შეფასების შემდეგ პარამეტრებს: ეფექტური კოდირების შემდეგ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის ობიქტური და სუბიექტური შედეგები; კოდირებული სიგნალის ხელშეშლამდგრადობა; ეფექტური კოდირების რეალიზაციის სიმარტივე. მაგრამ ძალიან ცუდი მაჩვენებელი აქვს კომპრესიის კოეფიციენტის თვალსაზრისით, რაც შეუძლებელს ხდის მის გამოყენებას ფერადი გამოსახულების სიგნალების რეალური სატელეკომუნიკაციო არხებით გადაცემისათვის, რადგან 625 სტრიქონის განშლის შემთხვევაში საჭირო იქნება 216 მბიტ/წმ სიჩქარე, რომელიც, თავის მხრივ, ითხოვს უფრო განიერ სიხშირულ ზოლს ანალოგიურ სიგნალ-

თან შედარებით (სტანდარტული ანალოგიური სატელევიზიო არხის სიხშირეთა ზოლის სიგანეა 6...8 მჰც, ხოლო 216 მბიტ/წმ-ის გადასაცემად საჭირო სიხშირეთა ზოლის სიგანე იქნება დაახლოებით 110-150 მჰც). ზემოთ აღნიშნულიდან გამომდინარე, საჭირო ხდება ИКМ სიგნალის კომპრესია [15, 16].

პრაქტიკაში ასევე გამოიყენება წინასწარმეტყველებითი კოდირება, კერძოდ კი დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაცია (ДИКМ), რომელიც წარმოადგენს გამოსახულების სიგნალის ელემენტების მიხედვით კოდირების მეთოდს. შესაბამისად მისი საშუალებით მიღწეული კომპრესიის ფაქტორი მცირეა. დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაციას ახასიათებს აგრეთვე დაბალი ხელშეშლამდგრადობა, რადგან გადაცემული ციფრული ნაკადის რომელიმე სიმბოლოს დამახინჯება იწვევს არა მარტო მისი შესაბამისი ელემენტის, არამედ მომდევნო ელემენტების დამახინჯებასაც. ამჟამად ДИКМ გამოიყენება ჰიბრიდულ სისტემებში და იგი შეხამებულია მოძრაობის კომპენსაციით წინასწარმეტყველებისა და უდანაკარგო კოდირების მეთოდებთან. ადაპტური კოდირების ასეთი შერწყმა გამოყენებულია როგორც უძრავი, ასევე მოძრავი გამოსახულებების კოდირების ყველა სტადარტში [14].

ადაპტურ სისტემებში აგრეთვე გამოიყენება ენტროპიული ანუ სტატისტიკური კოდირება. აღნიშნულ კოდირებას უწოდებენ აგრეთვე “უდანაკარგო კოდირებას”, რადგან მას შეუძლია კოდირების ნებისმიერი მეთოდის გამოყენების შემდეგ დარჩენილი სიჭარბის კომპრესია. იგი გამოყენებულია როგორც უძრავი, ასევე მოძრავი გამოსახულებების კოდირების ყველა სტადარტში. მისი ეს თვისება (დარჩენილი სიჭარბის კომპრესია) გამოარჩევს მას კოდირების სხვა მეთოდებისგან, რაც მის ღირსებას წარმოადგენს [19, 20, 21, 22].

კლოდ ელვუდ შენონმა (1916-2001) თავის ნაშრომში “ინფორმაციის თეორია” გამოთქვა თვალსაზრისი, რომ გამოსახულებათა კომპრესიისათვის გამოყენებული ყოფილიყო ბლოკური (ფრაგმენტული) კოდირება. ამ თვალსაზრისზე დამყარებით შეიქმა ვექტორული დაკვანტვის მეთოდი, რომელიც გამოსახულებათა სტატისტიკურ თავისებურებებთან ერთად ითვალისწინებს ადამიანის მხედველობითი აღქმის თავისებურებებს, რაც ამაღლებს კომპრესიის კოეფიციენტს. მაგრამ

ამასთან ერთად კომპრესიის კოეფიციენტის შედარებით მაღალი მნიშვნელობისას ვექტორული დაკვანტვის მეთოდით კოდირებულ გამოსახულებებზე შეიმჩნევა სხვადასხვა სახის სპეციფიკური დამახინჯებები ("ბლოკური სტრუქტურა", "კიბის სტრუქტურა" და "საზღვრების წაშლა") და აგრეთვე დამახინჯებები, რომლებიც დაკავშირებულია მოძრავ ობიექტებთან (მოძრავი ობიექტების გაწელვა) რაც იძლევა შენელებული კადრის ეფექტს. დამახინჯებების გამოსწორებისათვის შემოთავაზებულია რამოდენიმე მეთოდი, რაც ართულებს კოდირების მეთოდის აპარატურულ და ლოგიკურ რეალიზაციას, ხოლო იმის გამო, რომ ვექტორული დაკვანტვის მეთოდი წარმოადგენს დამოუკიდებელ მეთოდს, მისი შერწყმა სხვა მეთოდებთან შეუძლებელია და იგი ვერ გამოიყენება ეგრეტ წოდებულ შეხამებულ (შერწყმულ, ჰიბრიდულ) სისტემებში [23].

ადამიანის მხედველობითი აღქმის ერთ-ერთ თავისებურებას წარმოადგენს თვალის თვისება, რომელიც გამოიხატება გამოსახულების სიხშირული სპექტრის დიაპაზონის დაშლაში (დანაწილებაში) განსაზღვრული სივრცული ორიენტაციისა და სხვადასხვა სიხშირული ქვედიაპაზონების მქონე ზოლებად. დიდწილად ამ თვისებაზეა დამყარებული გამოსახულებათა სიგნალების პირამიდული კოდირების მეთოდი. რიგ ნაშრომში გაშუქებულია არაორთოგონალური და ორთოგონალური ტიპის პირამიდული აგებების საკითხები. თუმცა ჯერ კიდევ არაა გარკვეული მისი გამოყენების ეფექტურობისა და კოდირების სხვა მეთოდებთან შეხამების საკითხები.

ადამიანის მხედველობის ფსიქოფიზიოლოგიურ თვისებებს ემყარება აგრეთვე ადაპტური ჯგუფური კოდირების მეთოდი. იგი საშუალებას იძლევა გამოსახულების ერთი ელემენტისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა შემცირებული იქნას დაახლოებით 3,8-ჯერ. მაგრამ ამ მეთოდშიც გამოსახულებათა კოდირების აღდგენილი ბლოკების საზღვრებზე შეიმჩნევა დამახინჯებები. დღეისათვის დაუდგენელია კოდირების სხვა მეთოდებთან მისი შეხამებისა და, შესაბამისად, ჰიბრიდულ სისტემებში მისი გამოყენების შესაძლებლობა [24, 25, 26, 27].

წრფივი გარდასახვების გამოყენებით გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების მეთოდი, რომელიც ბლოკური (ფრაგმენტული, ჯგუფური) კოდირების მეთოდებს მიეკუთვნება, იძლევა არა მარტო

საწყისი სიგნალების სტატისტიკური თვისებების, არამედ ადამიანის თვალის ფსიქოფიზიოლოგიური თავისებურებების გათვალისწინების საშუალებას, რის გამოც მისი გამოყენებისას შეიძლება როგორც სტატისტიკური, ასევე ფსიქოფიზიოლოგიური სიჭარბის კომპრესია. აღნიშნულ მეთოდს საფუძვლად უდევს ისეთი წრფივი გარდასახვების გამოყენება, როგორიცაა: კარუნენ-ლოევის, დისკრეტულ კოსინუსური, უოლშის და მისი ნაირსახეობების (ადამარის, პელის), ჰაარის, ფურიეს, სინგულარული, დახრილი გარდასახვები და სხვა. მათი საშუალებით ტელესაკომუნიკაციო (მათ შორის გამოსახულებათა) სიგნალების ეფექტური კოდირების მიმართულებით აქტიური კვლევები დაიწყო გასული საუკუნის შუა წლებიდან [26, 27].

გამოსახულებათა წრფივი გარდასახვებით კოდირებისას მიიღწევა საწყის ფრაგმენტების ძლიერ კორელირებული ელემენტებიდან გარდასახვის შესაბამისი სივრცეების (ტრანსფორმანტების) მთლიანად დეკორელირებული ან შედარებით სუსტად კორელირებული კოეფიციენტების მიღება, რის შედეგადაც საწყის ფრაგმენტებში ენერგიის თანაბარი განაწილების ნაცვლად მიიღება მისი მკვეთრად არათანაბარი განაწილება ტრანსფორმანტებში. ეს გარემოება იძლევა ტრანსფორმანტის მცირე ენერგიის მქონე კოეფიციენტების საწყისი გამოსახულების ელემენტებთან შედარებით შემცირებული რაოდენობის სიმბოლოებით კოდირების საშუალებას, რითაც ხორციელდება გამოსახულების სიგნალების სტატისტიკური სიჭარბის კომპრესია [28, 29, 30, 31].

გამოსახულებათა წრფივი გარდასახვის მეთოდის გამოყენების დროს, ადამიანის მხედველობითი აღქმის თავისებურებების გათვალისწინება ხდება ტრანსფორმანტების ელემენტების დაკვანტვა-კოდირების პროცესში.

წრფივი გარდასახვებით გამოსახულებათა კოდირების მეთოდის შეხამება სხვა მეთოდებთან იძლევა კარგ შედეგს. მაგალითად, ეფექტურია მისი შეხამება წინასწარმეტყველებით კოდირებასთან გამოსახულების ობიექტების მოძრაობის კომპენსაციის გათვალისწინებით და უდანაკარგო კოდირების მეთოდებთან.

გამოსახულებათა სიგნალების წრფივი გარდასახვებით კოდირებისას ხდება საწყისი ფრაგმენტის N დისკრეტული ანათვლის

(ელემენტის) გარდასახვა ტრანსფორმანტის N კოეფიციენტებად (ჩვეულებრივ $N=2^i$, i=1, 2, …). კოდირების ეს მეთოდი შეიძლება გამოყე-ნებულ იქნას საწყისი გამოსახულების როგორც ერთგანზომილებიანი $1 \times N$ (გამოსახულების სტრიქონული განშლის მიმართულებით), ასევე ორგანზომილებიანი $N \times N$ (კადრის ორგანზომილებიანი ფრაგმენტების გარდასახვა) და სამგანზომილებიანი $N \times N \times N$ ფრაგმენტების დამუ-შავებისათვის. პირველი ორი ვარიანტი მიეკუთვნება შიდასაკადრო, ხო-ლო მესამე – კადრთაშორისი კოდირების მეთოდებს. ამასთანავე, პირ-ველ შემთხვევაში $N= n$, მეორე შემთხვევაში $N= n^2$, ხოლო მესამე შემთხ-ვევაში $N=n^3$, სადაც n გამოსახულების ფრაგმენტის (ბლოკის) სტრი-ქონსა და სვეტში დისკრეტული ანათვლების (ელემენტების, პიქსე-ლების) რაოდენობაა ერთგანზომილებიანი და ორგანზომილებიანი გარდასახვისას და კადრების რაოდენობაცაა სამგანზომილებიანი გარ-დასახვის შემთხვევაში. მეტყველების სიგნალების გარდასახვებით კო-დირებისას გამოიყენება ერთგანზომილებიანი გარდასახვა, ვინაიდან ამ კლასის სიგნალები ერთგანზომილებიანია [32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39].

არსებული წრფივი გარდასახვებიდან პირველ რიგში უნდა დახასიათდეს კარუნენ-ლოევის გარდასახვა, რადგან იგი წარმოადგენს ყველაზე ოპტიმალურს სრულად დეკორელირებული კოეფიციენტების არსებობის გამო, რის გამოც უზრუნველყოფს სტატისტიკური სიჭარბის სრულად შემცირებას. ეს ნიშნავს იმას, რომ ამ შემთხვევაში სტატისტიკური სიჭარბის კომპრესიის კოეფიციენტი მაქსიმალურია და აღდგენის საშუალო კვადრატული ცდომილება ნულია. მაგრამ ეს ყველაფერი შესაძლებელია მხოლოდ თეორიულად, ვინაიდან მას არ გააჩნია სწრაფი გარდასახვის ალგორითმი, რადგან მოითხოვს საწყისი გამოსახულების სტატისტიკის წინასწარ ცოდნას, რის გამოც ყოველი ფრაგმენტისათვის საჭიროა გარდასახვის შესაბამისი ოპტიმალური ბაზური მატრიცის შერჩევა, რაც პრაქტიკულად შეუძლებელს ხდის მის რეალიზაციას. მიუხედავად მისი არაპრაქტიკულობისა, თეორიულად ამ გარდასახვის განხილვა აუცილებელია, ვინაიდან იგი ოპტიმალურია და პრაქტიკაში გამოყენებულ სხვა გარდასახვების ეფექტურობის შეფასების შესაძლებლობას იძლევა.

ასევე ეფექტურია სინგულარული გარდასახვა მინიმალური საშუალო კვადრატული ცდომილების თვალსაზრისით. მაგრამ მისი განხორციელებისათვის შედარებით უფრო მეტი ოპერაციათა რაოდენობაა საჭირო, ვიდრე კარუნენ-ლოევის გარდასახვისთვის. მისი გამოყენება შეიძლება მხოლოდ მახსოვრობის სისტემებში, სადაც ისე მკაცრად არ არის შეზღუდული გარდასახვისათვის საჭირო განსახორციელებელი ალგორითმების რაოდენობა და მათ შესასრულებლად მოცემული დრო [24, 27, 34, 36, 37, 38, 39].

მონოტონურად და მცირედ ცვლადი სიკაშკაშის მქონე ფრაგმენტებისათვის გამოიყენება აგრეთვე დახრილი გარდასახვა. იგი გამოსადეგია მხოლოდ გამოსახულებათა მცირე ჯგუფისათვის.

კარუნენ-ლოევის გარდასახვასთან ყველაზე ახლო მდგომად ითვლება დისკრეტული კოსინუსური, უოლშის, ფურიეს და ჰაარის გარდასახვები.

გამოსახულების აღდგენის საშუალო კვადრატული ცდომილების მინიმალური მნიშვნელობის გამო, ყველაზე ეფექტურია ფურიეს გარდასახვა. მიუხედავად იმისა, რომ არსებობს ფურიეს გარდასახვის რეალიზაციის სწრაფი ალგორითმი, მისი პრაქტიკაში გამოყენება მაინც შეზღუდულია, რადგან ტრანსფორმანტის კოეფიციენტების გამოთვლისათვის აუცილებელია ჩატარდეს გამოთვლები როგორც მთელ, ასევე კომპლექსურ რიცხვებზე.

არსებული გარდასახვებიდან, პრაქტიკული რეალიზაციის თვალსაზრისით, ყველაზე მარტივია არის ჰაარის გარდასახვა, მაგრამ მისი გამოყენების შემთხვევაში სტატისტიკური სიჭარბის კომპრესიის კოეფიციენტი მინიმალურია სხვა გარდასახვებთან შედარებით და შესაბამისად იგი ყველაზე ნაკლებად ახდენს საწყისი სიგნალის დეკორელაციას.

გამოსახულების აღდგენის საშუალო კვადრატული ცდომილების მნიშვნელობით დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვა ყველაზე ახლო მდგომად ითვლება კარუნენ-ლოევის გარდასახვასთან. პრაქტიკული მნიშვნელობითაც მას გააჩნია გარდასახვის სწრაფი ალგორითმი და იგი შედარებით უფრო მცირე რაოდენობის ოპერაციას საჭიროებს, ვიდრე კარუნენ-ლოევის გარდასახვა. ასეთი თვისებების გამო

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვა წარმოადგენს JPEG და MPEG სტანდარტების ერთ-ერთ მთავარ კომპონენტს. მიუხედავად ასეთი შეფასებისა, აღსანიშნავია, რომ ამ გარდასახვის შესაბამისი ბაზური მატრიცის სტრიქონები (გარდა პირველი სტრიქონისა) შეიცავს არამთელ ელემენტებს, რის გამოც ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების გამოთვლისას უკვე შეუქცევად შეცდომებთან გვაქვს საქმე. თუმცა ასეთი შეცდომების არსებობა დასაშვებადაა მიჩნეული ადამიანის მხედველობის თავისებურებების გათვალისწინების გამო. ამავე მიზეზით შესაძლებელია დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების დაკვანტვა ამ მიზნით სპეციალურად შერჩეული დაკვანტვის მატრიცების საშუალებით, რაც გათვალისწინებული ზემოთ აღნიშნულ რეკომენდაციებში.

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვისაგან განსხვავებით უოლშის გარდასახვას და მისი ნაირსახეობებს არ გააჩნიათ მსგავსი ნაკლოვანებები. მიუხედავად ამისა მათი შედარებით დაბალი ეფექტურობის გამო უპირატესობა მაინც ენიჭება დისკრეტულ კოსინუსურ გარდასახვას, რის გამოც სწორედ მისი გამოყენება იქნა რეკომენდებული 1991 წელს კომპანია C-Cube Microsystems-ის სპეციალიტების მიერ შემუშავებულ JPEG (ISO/IEC 10918-1) და შემდგომ MPEG სტანდარტში.

მიღებული რეკომენდაციების და სტანდარტების მიხედვით ფერადი გამოსახულების კომპაქტური კოდირების საწყის ეტაპზე ხორციელდება სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის 8x8 ზომის ტრანსფორმანტების დაკვანტვა ამ მიზნით მათთვის შერჩეული იმავე ზომის დაკვანტვის ასიმეტრიული Q_y და სიმეტრიული Q_{Crb} მატრიცების გამოყენებით, რომელთა ელემენტების შერჩევა ხორციელდება მომხმარებლის მოთხოვნების გათვალისწინებით [9, 14, 21].

როგორც ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა, შესაძლებელია სხვადასხვა გამოსახულების სიკაშკაშის Y შემდგენისთვის, მისი ასიმეტრიულობის გამო, ისეთნაირად იქნას შერჩეული დაკვანტვის Q_y მატრიცის ელემენტები, რომ შესაძლებელი გახდეს კომპრესიის გაუმჯობესება კომპრესირებული გამოსახულებების ობიექტური

ხარისხობრივი მაჩვენებლების (საშუალოკვადრატული ცდომილება, სიგნალისა და ხმაურის ფარდობა და სხვა) შენარჩუნების პირობებში, ან გაუმჯობესდეს ხარისხობრივი მაჩვენებლები კომპრესიის ფაქტორის შენარჩუნებით [9, 14, 15, 19, 21, 31, 34, 40, 41].

ლიტერატურაში, გარდა ზემოთ ჩამოთვლილი კოდირების ბლოკური მეთოდებისა, განიხილება გამოსახულებათა კომპაქტური დამუშავება ვექტორული დაკვანტვის, ვეივლეტ-გარდასახვის და მორფოლოგიური კოდირების საშუალებით [42, 43, 44, 45].

მიუხედავად იმისა, რომ სიგნალების კომპაქტური კოდირების მიზნით ელემენტური (არაბლოკური) მეთოდის გამოყენება დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაციის საფუძველზე იძლევა მცირე ეფექტს კომპაქტური კოდირების თვალსაზრისით, ის მაინც გამოიყენება თანამედროვე სისტემებში კოდირების ბლოკურ მეთოდებთან შეხამებით. ასეთი ადაპტური კოდირება გათვალისწინებულია ზემოთ აღწერილ რეკომენდაციებშიც, რომლებიც გულისხმობს დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის, უდანაკარგო კოდირების, დიფერენციალური იმპულსურ-კოდური მოდულაციისა და მოძრაობის კომპენსაციის მეთოდების შერწყმას, რითაც მიიღწევა კოდირების მაღალი ეფექტურობა [1, 2, 3, 4, 14, 15, 21].

მაშასადამე, გამოსახულებათა სიგნალების კომპაქტური კოდირების ადაპტური მეთოდის ერთ-ერთ ძირითად კომპონენტს წარმოადგენს დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შეხამება გარდასახვის სივრცის (ტრანსფორმანტას) უდანაკარგო კოდირებასთან, რომელიც შეიძლება განხორციელდეს როგორც ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებით, ასევე ეგრეთ წოდებული არითმეტიკული კოდირებით [14, 15, 21].

სამუშაოს შედეგები და მათი განსჯა

თავი 1. დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების უდანაკარგო ეფექტური კოდირების ბლოკური მეთოდი

1.1. გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების მეთოდი დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის საფუძველზე

ციფრული სიგნალების კომპაქტური კოდირების თვალსაზრისით საუკეთესოდაა მიჩნეული ციფრულ გამოსახულებათა გარდაქმნა, დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის (DCT – Discrete Cosine Transform) გამოყენებით, რომელიც შესაბამისი საერთაშორისო სტანდარტების ერთ-ერთ ძირითად კომპონენტს წარმოადგენს [1, 2, 3].

ციფრულ გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების JPEG და MPEG სტანდარტები ითვალისწინებს გამოსახულებათა 8x8 ზომის [f(x,y)] (x,y=0,1,2,…,7) მატრიცის სახით წარმოდგენილი ფრაგმენტების f(x,y) ელემენტების ერთობლიობის გარდასახვას (პირდაპირი გარდასახვა) და შედეგად მიღებული იმავე ზომის მატრიცის სახით წარმოდგენილი [F(u,v)] (u,v=0,1,2,…,7) ტრანსფორმანტების (გარდასახვის სივრცეების) F(u,v) კოეფიციენტების დაკვანტვას, მათ კოდირებასა და გადაცემას (ან შენახვას). გარდასახულ გამოსახულებათა აღდგენა კი ხორციელდება ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების დეკვანტირებითა და შესაბამისი უკუგარდასახვის გამოყენებით. შევნიშნოთ, რომ f(x,y) წარმოადგენს საწყის გამოსახულებათა ფრაგმენტების ელემენტების ინტენსივობებს, ხოლო F(u,v) – გარდასახვის შედეგად მიღებული ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების მნიშვნელობებს. უნდა აღინიშნოს, რომ გამოსახულებათა f(x,y) ელემენტების წარმოდგენა ხდება 8-თანრიგა ორობითი რიცხვებით, რაც იმას ნიშნავს, რომ მათი ინტენსივობების რაოდენობაა 256 (ინტენსივობათა მნიშვნელობებია 0, 1, 2, …, 255, ანუ თითოეული მათგანის ორობითი კოდირებისათვის საჭიროა 8 სიმბოლო).

პრაქტიკაში გამოიყენება დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის (DCT – Discrete Cosine Transform) ის ვარიანტი, რომლის საბაზო მატრიცას აქვს შემდეგი სახე:

$$[DCT]=\begin{bmatrix} 0,354 & 0,354 & 0,354 & 0,354 & 0,354 & 0,354 & 0,354 & 0,354 \\ 0,490 & 0,416 & 0,278 & 0,098 & -0,098 & -0,278 & -0,416 & -0,490 \\ 0,462 & 0,191 & -0,191 & -0,462 & -0,462 & -0,191 & 0,191 & 0,462 \\ 0,416 & -0,098 & -0,49 & -0,278 & 0,278 & 0,490 & 0,098 & -0,416 \\ 0,354 & -0,354 & -0,354 & 0,354 & 0,354 & -0,354 & -0,354 & 0,354 \\ 0,278 & -0,490 & 0,098 & 0,416 & -0,416 & -0,098 & 0,490 & -0,278 \\ 0,191 & -0,462 & 0,462 & -0,191 & -0,191 & 0,462 & -0,462 & 0,191 \\ 0,098 & -0,278 & 0,416 & -0,490 & 0,490 & -0,416 & 0,278 & -0,098 \end{bmatrix}$$

აღნიშნული ორგანზომილებიანი გარდასახვის [F(u,v)] ტრანსფორმანტები მიიღება შემდეგი მატრიცების გადამრავლებით:

$$[F(u,v)]= [DCT]x[f(x,y)]x[DCT]^T,$$

სადაც $[DCT]^T$ ტრანსპონირებული მატრიცაა.

უკუგარდასახვა (გამოსახულების ფრაგმენტის აღდგენა) კი ხდება შემდეგი გარდაქმნის საფუძველზე:

$$[f(x,y)]= [DCT]^{-1}x[F(u,v)]x[DCT]^{-1T}.$$

ამ გამოსახულებაში “-1” უკუმატრიცის აღმნიშვნელია.

პირდაპირი გარდასახვის შედეგად მიღებული კოეფიციენტების შესაძლო მაქსიმალური მნიშვნელობების ერთობლიობა იმის გათვალისწინებით, რომ გამოსახულების ელემენტების ინტენსივობის მაქსიმუმია 255, როგორც შესაბამისმა გამოთვლებმა აჩვენა, შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი მატრიცის სახით:

$$[F(u,v)]_{\text{მაქს.}} = \begin{bmatrix} 2040 & 924 & 942 & 871 & 1020 & 771 & 942 & 924 \\ 924 & 543 & 654 & 656 & 654 & 600 & 665 & 837 \\ 942 & 654 & 616 & 669 & 804 & 673 & 616 & 681 \\ 871 & 656 & 669 & 502 & 679 & 656 & 652 & 837 \\ 1020 & 654 & 804 & 679 & 510 & 640 & 804 & 590 \\ 771 & 600 & 673 & 656 & 640 & 438 & 656 & 837 \\ 942 & 665 & 616 & 652 & 804 & 656 & 653 & 665 \\ 924 & 837 & 681 & 837 & 590 & 837 & 665 & 837 \end{bmatrix}$$

ცნობილია, რომ გამოსახულების სიკაშკაშის შემდგენის შესაბამისი გარდასახვის კოეფიციენტების დაკვანტვისათვის გამოიყენება მატრიცა $[Q_y]$ და ჰაფმანის კოდი (დაკვანტული $[F(u,v)]$ ტრანსფორმანტების დამატებითი დანაკარგების გარეშე კოდირებისათვის) [47, 48].

$$[Q_y] = \begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix}$$

$[Q_{r,b}]$ მატრიცა გამოიყენება მხოლოდ ფერადი გამოსახულების ფერსხვაობითი C_r და C_b მდგენელებისათვის.

$$[Q_{r,b}] = \begin{bmatrix} 17 & 18 & 24 & 47 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 18 & 21 & 26 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 24 & 26 & 56 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 47 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \end{bmatrix}$$

აღნიშნულიდან გამომდინარე, $[F(u,v)]_{\text{მაქს.}}$ მატრიცის ელემენტების $[Q_y]$ მატრიცის ელემენტებით დაკვანტვის შედეგად მიიღება:

$$[F'(u,v)]_{\text{მაქს.}} = \begin{bmatrix} 128 & 84 & 94 & 54 & 42 & 19 & 19 & 15 \\ 77 & 45 & 47 & 35 & 25 & 10 & 11 & 15 \\ 67 & 50 & 39 & 27 & 20 & 12 & 9 & 13 \\ 62 & 39 & 30 & 17 & 13 & 8 & 8 & 14 \\ 57 & 30 & 22 & 10 & 8 & 6 & 8 & 8 \\ 32 & 17 & 12 & 8 & 8 & 4 & 6 & 9 \\ 19 & 10 & 8 & 8 & 8 & 5 & 5 & 7 \\ 13 & 9 & 7 & 8 & 5 & 8 & 7 & 9 \end{bmatrix}$$

რეალური გამოსახულების დაკვანტვის შედეგად მიღებული F'(u,v) მატრიცის კოდირება ჰაფმანის მეთოდის გამოყენებით გულისხმობს მატრიცის კოეფიციენტების ზიგზაგისებური სკანირების შედეგად მიღებული მიმდევრობის კოდირება ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებით [19, 21, 49].

გარდასახვის კოეფიციენტების ზიგზაგისებური სკანირების შემდეგ იმ კოეფიციენტებს, რომელთა შორის არ არსებობს თუნდაც ერთი ნული, ჰაფმანის ცხრილის მიხედვით შეუსაბამებენ სხვადასხვა სიგრძის ორობით კოდს, ხოლო ნულის ან ნულების არსებობის შემთხვევაში ბოლო ნულის შემდგომი კოეფიციენტის კოდირებას ახორციელებენ წინა ნულთან (ან ნულებთან) ერთად ასეთი შემთხვევისათვის შედგენილი ჰაფმანის სპეციალური ცხრილის მიხედვით. სკანირებულ მიმდევრობაში ნულის არატოლი კოეფიციენტების კოდირების დამთავრების შემდეგ კი ფორმირდება ოთხთანრიგა კოდური ჯგუფი EOB (end of blok - ბლოკის დასასრული). იგი წარმოადგენს ოთხთანრიგა ორობით რიცხვს 1010 და აღნიშნავს მოცემული ტრანსფორმანტას კოეფიციენტების კოდირების დამთავრებას.

1.2. დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების უდანაკარგო ეფექტური კოდირების ბლოკური მეთოდი

ჰაფმანის ცხრილით ტრანსფორმანტას კოეფიციენტების კოდირებისას კომპრესიის ფაქტორი საკმაოდ დიდია და იგი იძლევა გამოსახულების შესაბამისი გარდასახვის კოეფიციენტების უდანაკარგო კოდირების შესაძლებლობას. მაგრამ მიუხედავად ამისა გამოსახულებათა სიგნალების ეკონომიური კოდირების ეფექტურობის ამაღლება (შეკუმშვის ფაქტორის გაზრდა) დამატებითი დანაკარგების გარეშე აქტუალური პრობლემაა. გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ შეიძლება მოიძებნოს კოდირების ისეთი მეთოდი, რომელიც მოგვცემს უფრო მეტი კომპრესიის მიღწევის საშუალებას ჰაფმანის მეთოდთან შედარებით.

კომპაქტური კოდირების (კომპრესიის) ეფექტურობა შესაძლებელია თვალნათლივ შეფასდეს შემდეგი პარამეტრების საშუალებით:

1. C – კომპრესიის კოეფიციენტი ($C = M_2/M_1$, სადაც M_1 საწყისი გამოსახულების კოდირებისათვის დახარჯული ბიტების რაოდენობაა, ხოლო M_2 – კომპრესირებული გამოსახულებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა);

2. კომპრესიის ფაქტორი $F = 1/C = M_1/M_2$.

NxN ზომის გამოსახულებისათვის კომპრესიის ფაქტორი

$$F= m_1 N^2 / \left(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} m_2(i,j)\right),$$

სადაც: N გამოსახულების სტრიქონების და თითოეულ სტრიქონში არსებული ელემენტების, m_1 – საწყისი გამოსახულების ერთი ელემენტის კოდირებისათვის დახარჯული ბიტების, $m_2(i,j)$ – კომპრესირებული ფრაგმენტის ერთი ელემენტისათვის საშუალოდ გამოყენებული სიმბოლოების რაოდენობებია.

გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების შემოთავაზებული მეთოდის არსი განხილულია $[F_1(u,v)]$ ტრანსფორმანტას მაგალითზე. შევნიშნოთ, რომ ტრანსფორმანტა $[F_1(u,v)]$ მიიღება დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შედეგად ფორმირებული $[F(u,v)]$ დაკვანტვით. კოდირების შემოთავაზებული მეთოდი ხორციელდება ეტაპობრივად შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. ტრანსფორმანტას $F_1(0,0)$კოეფიციენტის დამოუკიდებელი კოდირება. აღნიშნული კოეფიციენტის კოდირებისათვის საკმარისია 7 ბიტი, ვინაიდან დაკვანტვამდე მისი მაქსიმალური მნიშვნელობა თეორიულად შეიძლება იყოს 2040-ის ტოლი (ამ შემთხვევაში გამოსახულების ფრაგმენტის 64-ვე ელემენტის ინტენსივობის ნომერია 255), ხოლო დაკვანტვის შემდეგ – 127. $F_1(0,0)$ კოეფიციენტის 7-ბიტიანი რიცხვით კოდირების შემდეგ $[F_1(u,v)]$ ტრანსფორმანტა, რომელიც შეიცავს მხოლოდ დანარჩენ 63 კოეფიციენტს, შეიძლება წარმოდგეს შემდეგი მატრიცის სახით.

$$[F_1(u,v)]=$$

$$
\begin{array}{cc:cc|cc:cc}
F_1(0,0) & F_1(0,1) & F_1(0,2) & F_1(0,3) & F_1(0,4) & F_1(0,5) & F_1(0,6) & F_1(0,7) \\
F_1(1,0) & F_1(1,1) & F_1(1,2) & F_1(1,3) & F_1(1,4) & F_1(1,5) & F_1(1,6) & F_1(1,7) \\
\hdashline
F_1(2,0) & F_1(2,1) & F_1(2,2) & F_1(2,3) & F_1(2,4) & F_1(2,5) & F_1(2,6) & F_1(2,7) \\
F_1(3,0) & F_1(3,1) & F_1(3,2) & F_1(3,3) & F_1(3,4) & F_1(3,5) & F_1(3,6) & F_1(3,7) \\
\hline
F_1(4,0) & F_1(4,1) & F_1(4,2) & F_1(4,3) & F_1(4,4) & F_1(4,5) & F_1(4,6) & F_1(4,7) \\
F_1(5,0) & F_1(5,1) & F_1(5,2) & F_1(5,3) & F_1(5,4) & F_1(5,5) & F_1(5,6) & F_1(5,7) \\
\hdashline
F_1(6,0) & F_1(6,1) & F_1(6,2) & F_1(6,3) & F_1(6,4) & F_1(6,5) & F_1(6,6) & F_1(6,7) \\
F_1(7,0) & F_1(7,1) & F_1(7,2) & F_1(7,3) & F_1(7,4) & F_1(7,5) & F_1(7,6) & F_1(7,7)
\end{array}
$$

2. ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ [$F_1(u,v)$] ტრასფორმანტა შეიცავს თუ არა მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს (1 ბიტი).

იმ შემთხვევაში, როდესაც [$F_1(u,v)$] ტრანსფორმანტას ყველა კოეფიციენტი ნულია, მაშინ ეს ინფორმაცია აღინიშნება სიმბოლო 0-ით, ხოლო თუ ტრანსფორმანტას ერთი კოეფიციენტი მაინც განსხვავდება ნულისგან – სიმბოლო 1-ით. აღსანიშნავია, რომ რეალურ გამოსახულებებში შესაძლებელია ისეთი შემთხვევის არსებობა, რის გამოც შესაბამისი ტრანსფორმანტას კოდირების პროცესი ამ ეტაპზევე დამთავრდება. შესაბამისად, 8-ბიტიანი ინფორმაციით მოხდება ფრაგმენტის კოდირება და შეკუმშვის ფაქტორი იქნება 512/8=64 (ფრაგმენტის ერთი ელემენტის კოდირებისათვის, ნაცვლად 8 ბიტისა, საკმარისი აღმოჩნდება 8/64=0,125 ბიტი.

3. [$F_1(u,v)$] ტრანსფორმანტა დაიყოფა 4x4 ზომის მარცხენა ზედა და ქვედა (ბლოკი 1 და ბლოკი 3) და მარჯვენა ზედა და ქვედა (ბლოკი 2 და ბლოკი 4) 4 ბლოკად ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია [$F_1(u,v)$] ტრანსფორმანტაზე და ფორმირდება 3-ბიტიანი ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ მე-2, მე-3 და მე-4 ბლოკებში შემავალი ყველა კოეფიციენტი არის თუ არა ნულის ტოლი. იმ ბლოკებს, რომლებიც შეიცავენ მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს, პირობითად ეწოდებათ ნულოვანი ბლოკები, ხოლო დანარჩენ ბლოკებს – არანულოვანი ბლოკები. ვინაიდან მე-2 პუნქტის შესრულების შედეგად დადგინდა, რომ ტრანსფორმანტას ყველა კოეფიციენტი არაა ნულის ტოლი, ამიტომ ნათელია, რომ 1-ლი ბლოკი არანულოვანია. შედეგად

ფორმირდება შესაბამისი სამთანრიგა კოდური ჯგუფი (თუ ბლოკში ყველა კოეფიციენტი (ან ერთი მაინც) არაა ნულის ტოლი (სიმბოლო 1), ხოლო თუ ყველა კოეფიციენტი ნულის ტოლია (სიმბოლო 0).

4. ოთხ ბლოკად დაყოფილი [$F_1(u,v)$] ტრანსფორმანტას თითოეული ბლოკი დაიყოფა 4 ქვებლოკად ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია [$F_1(u,v)$] ტრანსფორმანტაზე და თითოეული ქვებლოკისათვის (გარდა იმ ქვებლოკებისა, რომლებიც ეკუთვნიან ნულოვან ბლოკებს, და 1-ლ ბლოკში შემავალი ქვებლოკებისა, თუ დანარჩენი ბლოკებიდან ერთ-ერთი მაინც არაა ნულოვანი ბლოკი) ფორმირდება 4-ბიტიანი ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ ქვებლოკებში შემავალი ყველა კოეფიციენტი არის თუ არა ნულის ტოლი.

წინა ეტაპის მსგავსად თითოეული ბლოკის ქვებლოკები დანომრილია ტრანსფორმანტას ბლოკების დანომვრის პრინციპით და იმ ქვებლოკებს, რომლებიც შეიცავენ მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს, პირობითად ეწოდებათ ნულოვანი ქვებლოკები, ხოლო დანარჩენებს – არანულოვან ქვებლოკები.

5. იმ არანულოვანი ბლოკის ქვებლოკებში ნულის ტოლი და არატოლი კოეფიციენტების დადგენა, რომელიც შეიცავს ნულოვან ქვებლოკებს.

6. პირველი ხუთი პუნქტის შესრულების შედეგად დარჩენილი ქვებლოკების კოეფიციენტების ამპლიტუდურ მნიშვნელობათა კოდირება.

იმის გამო, რომ ტრანსფორმანტების ნულის არატოლი კოეფიციენტების თეორიულად შესაძლო მნიშვნელობები არ აღემატება ისეთ ათობით რიცხვს, რომლისთვისაც საკმარისია 7-თანრიგა კოდი, 3-ბიტიანი კოდით შეიძლება აღინიშნოს მაქსიმალური კოეფიციენტის კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა.

7. დარჩენილი კოეფიციენტების ნიშნების (დადებითი და უარყოფითი) აღმნიშვნელი ინფორმაცია.

8. განსახილველად დარჩენილი კოეფიციენტების ამპლიტუდების კოდირება საკმარისი რაოდენობის ბიტებით.

აღნიშნული ეტაპის შესრულებისას გასათვალისწინებელია აგრეთვე მე-7 ეტაპზე დაფიქსირებული კოეფიციენტების ნიშნების სიმბოლოები.

ამრიგად, კოდირების შემოთავაზებული მეთოდი შეიცავს 8 ეტაპს. რაც შეეხება დეკოდირებას, იგი განხორციელდება შესაბამისი ეტაპების შებრუნებული თანმიმდევრობით.

როგორც ჩანს, არც ერთი ეტაპი არ გულისხმობს დანაკარგების ხარჯზე კომპრესიის ფაქტორის გაზრდას.

მაგალითის სახით მოყვანილია გამოსახულების 8x8 ზომის ერთი ფრაგმენტის კოდირება, როგორც ჰაფმანის, ასევე შემოთავაზებული ბლოკური კოდირების მეთოდების გამოყენებით.

რეალური გამოსახულების სიკაშკაშის შემდგენის 8x8 ზომის ერთ-ერთი ფრაგმენტის შესაბამისი f(x,y) ელემენტების ერთობლიობა წარმოდგენილია შემდეგი მატრიცის სახით:

$$[f(x,y)]=\begin{bmatrix} 21 & 35 & 102 & 183 & 210 & 204 & 180 & 150 \\ 73 & 155 & 201 & 209 & 190 & 170 & 162 & 192 \\ 188 & 211 & 196 & 182 & 168 & 170 & 194 & 208 \\ 211 & 189 & 179 & 178 & 180 & 200 & 208 & 205 \\ 177 & 180 & 170 & 187 & 201 & 207 & 205 & 203 \\ 180 & 172 & 195 & 203 & 206 & 203 & 200 & 198 \\ 183 & 202 & 205 & 201 & 199 & 196 & 193 & 193 \\ 203 & 205 & 198 & 198 & 194 & 192 & 192 & 194 \end{bmatrix}$$

აღნიშნული მატრიცის დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შედეგად მიიღება ტრანსფორმანტა [F(u,v)].

$$[F(u,v)]=\begin{bmatrix} 1467 & -90 & -58 & -21 & 0 & -2 & -4 & -5 \\ -121 & -93 & -69 & -22 & 2 & 0 & -2 & -4 \\ -79 & -51 & -85 & -16 & 4 & -1 & 0 & -1 \\ -60 & -85 & -78 & 27 & 14 & 10 & 6 & 4 \\ -32 & -43 & -5 & 53 & 13 & 14 & 0 & -2 \\ -9 & -8 & 13 & 33 & 2 & 15 & 2 & 3 \\ -4 & -4 & 16 & 22 & 9 & 13 & 0 & 4 \\ -5 & -1 & 9 & 7 & -3 & -6 & -10 & -2 \end{bmatrix}$$

გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების ეფექტურობის ამაღლების მიზნით დამუშავებული JPEG და MPEG სტანდარტებით გათვალისწინებულია გამოსახულების სიკაშკაშის შემდგენის გარდასახვის შედეგად მიღებული ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების დაკვანტვა [Q_y] მატრიცით, რის შედეგადაც მიიღება მატრიცა [F_1(u,v)]:

$$[F_1(u,v)]=\begin{bmatrix} 92 & -8 & -6 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -10 & -8 & -5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & -4 & -5 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4 & -5 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ჰაფმანის მეთოდით ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების კოდირებამდე ხორციელდება კოეფიციენტების ზიგზაგისებური სკანირება, რის შედეგადაც ისინი ლაგდება შემდეგი თანმიმდევრობით: 92, -8, -10, -6, -8, -6, -1, -5, -4, -4, -2, -5, -5, -1, 0, 0, 0, -1, -4, -2, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, ..., 0 [21].

მოცემულ კოეფიციენტებს, ჰაფმანის ცხრილის მიხედვით შეესაბამება სხვადასხვა სიგრძის ორობითი კოდი. განხილული შემთხვევისათვის კოეფიციენტების შესაბამისი კოდური ჯგუფებია: 92–111111101011100 (15 ბიტი); -8–111100111 (9 ბიტი); -10–111100101 (9 ბიტი); -6 – 1110001 (7 ბიტი); -8–111100111 (9 ბიტი); -6–1110001 (7 ბიტი); -1–100 (3 ბიტი); -5 – 1110010 (7 ბიტი); -4–1110011 (7 ბიტი); -4–1110011 (7 ბიტი); -2–10011 (5 ბიტი); -5 – 1110010 (7 ბიტი); -5–1110010 (7 ბიტი); -1–100 (3 ბიტი); 0,0,0,-1–1110100 (7 ბიტი); -4 –1110011 (7 ბიტი); -2–11001 (5 ბიტი); 0,0,0,0,1–1110111 (7 ბიტი); 0,0,0,0,0,0,0,1–111110101 (9 ბიტი); 0,0,0,0,0,1–11110101 (8 ბიტი); 0, ... ,- 0 (სულ 25 ნული),1010 (EOB) (4 ბიტი).

ამრიგად, განხილული 64-კოეფიციენტიანი ტრანსფორმანტას საბოლოო კოდი იქნება 149-ბიტიანი რიცხვი:

111111101011100111100111111100101111000111110011111100011001110010111
001111100111001111100101110010100111010011100111100111101111111101011
11101011010.

გამოსახულების 8x8 ზომის [f(x,y)] ფრაგმენტის კოდირებისათვის, მისი ყოველი f(x,y) ელემენტის 8 ბიტით წარმოდგენისას, საჭიროა 8x64=512 ბიტი. აღნიშნული ფრაგმენტის გარდასახვის შედეგად კი მიღებული ტრანსფორმანტას კოდირებისათვის საკმარისი აღმოჩნდა 149 ბიტი, რის გამოც შეკუმშვის ფაქტორია 512/149≈3,44. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ თუ საწყისი გამოსახულების ერთი ელემენტის კოდირებისათვის გამოიყენებოდა 8 ბიტი, ამჯერად, კომპაქტური კოდირების შედეგად, საკმარისი აღმოჩნდა 8/3,44≈2,33 ბიტი.

[F_1(u,v)] ტრანსფორმანტას მაგალითზე გამოსახულების კოდირების შემოთავაზებული ბლოკური მეთოდი ხორციელდება ზემოთ აღწერილი ეტაპების შემდეგი თანმიმდევრობით:

1. ტრანსფორმანტას F_1(0,0)კოეფიციენტის დამოუკიდებელი კოდირება. ვინაიდან F_1(0,0)=92, ამიტომ მისი შესაბამისი 7-ბიტიანი ორობითი რიცხვია 1011100.

2. ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ [F_2(u,v)] ტრასფორმანტა ნულოვანია თუ არანულოვანი. მოცემულ შემთხვევაში [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტას ყველა კოეფიციენტი არაა ნულის ტოლი, რის გამოც ფორმირდება სიმბოლო 1.

3. [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტას დაყოფა 4x4 ზომის მარცხენა ზედა და ქვედა (ბლოკი 1 და ბლოკი 3) და მარჯვენა ზედა და ქვედა (ბლოკი 2 და ბლოკი 4) 4 ბლოკად. მოცემულ შემთხვევაში ფორმირდება კოდური ჯგუფი 010, რაც იმას ნიშნავს, რომ მე-3 ბლოკში ყველა კოეფიციენტი (ან ერთი მაინც) არაა ნულის ტოლი (სიმბოლო 1), ხოლო მე-2 და მე-4 ბლოკებში – ყველა კოეფიციენტი ნულის ტოლია (სიმბოლო 0).

4. ოთხ ბლოკად დაყოფილი [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტას თითოეული ბლოკის დაყოფა 4 ქვებლოკად. განხილულ მაგალითში ფორმირდება 4-ბიტიანი კოდი (1100) მე-3 ბლოკის ქვებლოკების შესახებ.

5. იმ არანულოვანი ბლოკის ქვებლოკებში ნულის ტოლი და არატოლი კოეფიციენტების დადგენა, რომელიც შეიცავს ნულოვან ქვებლოკებს.

განხილულ მაგალითში ასეთია მე-3 ბლოკი და, ვინაიდან მისი მე-3 და მე-4 ქვებლოკების შემადგენლობის შესახებ უკვე არსებობს ინფორმაცია წინა პუნქტის მიხედვით, ამიტომ განიხილება მხოლოდ აღნიშნული ბლოკის ზედა (1-ლი და მე-2) ქვებლოკები. შესაბამისად, მოცემულ შემთხვევაში პირველი ქვებლოკისათვის ფორმირდება 4-ბიტიანი კოდი 1100, ხოლო მეორე ქვებლოკისათვის – ასევე 4-ბიტიანი კოდი 0101 (სულ 8 ბიტი). 1-ით აღნიშნულია ნულის არატოლი კოეფიციენტი, ხოლო 0-ით – ნულის ტოლი კოეფიციენტი. აქედან გამომდინარე, ამ ეტაპზე ფორმირდება 8-ბიტიანი რიცხვი 11000101.

პირველი ხუთი პუნქტის შესრულების შედეგად მოცემულ შემთხვევაში დადგენილია 19 კოეფიციენტის კოორდინატები. ამიტომ შემდეგ ეტაპებზე ხორციელდება მხოლოდ მათი ნიშნებისა და მნიშვნელობების კოდირება.

6. პირველი ხუთი პუნქტის შესრულების შედეგად დარჩენილი ქვებლოკების კოეფიციენტების ამპლიტუდურ მნიშვნელობათა კოდირება. რეალური გამოსახულებებისათვის 1-ლი ბლოკის 1-ლ ქვებლოკში შემავალი კოეფიციენტების მნიშვნელობები აღემატება დანარჩენი კოეფიციენტების მნიშვნელობებს. ამის გამო განხორციელდება 1-ლი ბლოკის 1-ლ ქვებლოკში შემავალი სამივე კოეფიციენტის დამოუკიდებელი კოდირება.

ვინაიდან მოცემულ შემთხვევაში განსახილველად დარჩენილია 1-ლი ბლოკის 1-ლი და დანარჩენი სამი ქვებლოკი და მე-3 ბლოკის 1-ლი და მე-2 ქვებლოკების კოეფიციენტები, ამიტომ აღნიშნული ინფორმაციის დაფიქსირებისათვის საჭიროა 3x3=9 ბიტი. კერძოდ, 1-ლი ბლოკის 1-ლი ქვებლოკის შესაბამისი 3-ბიტიანი კოდი იქნება 100, ვინაიდან მასში შემავალი მაქსიმალური კოეფიციენტის მნიშვნელობაა 10, შესაბამისად მე-2, მე-3 და მე-4 ქვებლოკებისათვის – 011, ხოლო მე-2 ბლოკისათვის – 001. უკანასკნელ შემთხვევაში საკმარისია 1 ბიტი, ვინაიდან ამ ბლოკის არანულოვანი კოეფიციენტების მნიშვნელობებია მხოლოდ 2 და 1.

მაშასადამე, კოდირების მოცემულ ეტაპზე ფორმირდება 9-ბიტიანი კოდი 100011001.

7. დარჩენილი კოეფიციენტების ნიშნების (დადებითი და უარყოფითი) აღმნიშვნელი ინფორმაცია. ამ შემთხვევაში ეს ინფორმაცია 19-ბიტიანი კოდია, ვინაიდან დარჩენილი კოეფიციენტების რაოდენობაა 19. შემდგომ ხდება 19-ვე კოეფიციენტის სტრიქონული სკანირება. კოეფიციენტების დადებითი ნიშანი აღინიშნება 1-ით, უარყოფითი – 0-ით. სკანირებისას გამოტოვებული იქნება მე-3 ბლოკის 1-ლი და მე-2 ქვებლოკების ნულის ტოლი კოეფიციენტები, რომელთა შესახებაც ინფორმაცია ფორმირებულია მე-5 ეტაპზე. გარდა ამისა, თუ ამ ეტაპზე განსახილველი კოეფიციენტებიდან რომელიმე მათგანი ნულის ტოლია, მაშინ ის პირობითად ჩაითვლება დადებითად (მოცემულ შემთხვევაში 19-ვე კოეფიციენტი ნულის არატოლია). შესაბამისად სტრიქონულად სკანირებული კოეფიციენტები დალაგდება შემდეგი თანმიმდევრობით: $F_1(0,1)$, $F_1(0,2)$, $F_1(0,3)$, $F_1(1,0)$, $F_1(1,1)$, $F_1(1,2)$, $F_1(1,3)$, $F_1(2,0)$, $F_1(2,1)$, $F_1(2,2)$, $F_1(2,3)$, $F_1(3,0)$, $F_1(3,1)$, $F_1(3,2)$, $F_1(3,3)$, $F_1(4,0)$, $F_1(4,1)$, $F_1(4,3)$, $F_1(5,3)$.

ზემოაღნიშნულის გათვალისწინებით მოცემული მაგალითისათვის 19-ბიტიან მიმდევრობას ექნება შემდეგი სახე: 0000000000000010011, სადაც 0-ით აღნიშნულია უარყოფითი ნიშანი, ხოლო 1-ით – დადებითი.

8. განსახილველად დარჩენილი კოეფიციენტების ამპლიტუდების კოდირება საკმარისი რაოდენობის ბიტებით.

აღნიშნული ეტაპის შესრულებისას გასათვალისწინებელია აგრეთვე მე-7 ეტაპზე დაფიქსირებული კოეფიციენტების ნიშნების სიმბოლოები, ამიტომ განსახილველ მაგალითში 1-ლი და მე-3 ბლოკების კოეფიციენტების ნიშნებისა და ამპლიტუდების კოდირებისათვის საკმარისი ბიტების რაოდენობა განაწილდება შემდეგნაირად:

1-ლი ბლოკის 1-ლი ქვებლოკი (იგი შედგება 3 კოეფიციენტისაგან) მაქსიმალური კოეფიციენტისათვის – 1 (ნიშანი) + 4 (ამპლიტუდა)=5 ბიტი (სულ 3 კოეფიციენტისათვის – 15 ბიტი). აღნიშნულის გათვალისწინებით, 1-ლი ბლოკის 1-ლი ქვებლოკის კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 5-ბიტიანი კოდური ჯგუფებია: -8 (01000); -10 (01010); -8 (01000).

1-ლი ბლოკის მე-2 ქვებლოკის (იგი შედგება 4 კოეფიციენტისაგან) მაქსიმალური კოეფიციენტისათვის – 4 ბიტი (სულ ოთხივე კოეფიციენტისათვის – 16 ბიტი). კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 4 - ბიტიანი (ნიშნის ჩათვლით) კოდური ჯგუფებია: -6 (0110); -1 (0001); -5 (0101); -1 (0001).

1-ლი ბლოკის მე-3 ქვებლოკის (იგი შედგება 4 კოეფიციენტისაგან) მაქსიმალური კოეფიციენტისათვის – 4 ბიტი (სულ ოთხივე კოეფიციენტისათვის – 16 ბიტი). კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 3-ბიტიანი კოდური ჯგუფებია: -6 (0110); -4 (0100); -4 (0100); -5 (0101).

1-ლი ბლოკის მე-4 ქვებლოკის (იგი შედგება 4 კოეფიციენტისაგან) მაქსიმალური კოეფიციენტისათვის – 4 ბიტი (სულ ოთხივე კოეფიციენტისათვის – 16 ბიტი). კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 4-ბიტიანი კოდური ჯგუფებია: -5 (0101); -1 (0001); -4 (0100); 1 (1001).

მე-3 ბლოკის 1-ლი ქვებლოკის განსახილველად დარჩენილი 2 კოეფიციენტიდან თითოეულისათვის 2 ბიტი (სულ ორივე კოეფიციენტისათვის – 4 ბიტი). კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 2-ბიტიანი კოდური ჯგუფებია: -2 (01); -2 (01).

მე-3 ბლოკის მე-2 ქვებლოკის განსახილველად დარჩენილი 2 კოეფიციენტიდან თითოეულისათვის – 2 ბიტი (სულ ორივე კოეფიციენტისათვის – 4 ბიტი). კოეფიციენტების მნიშვნელობები და შესაბამისი 2-ბიტიანი კოდური ჯგუფებია: 1 (10); 1 (10).

მაშასადამე, მე-8 ეტაპზე განსახილველი კოეფიციენტების მნიშვნელობათა კოდირებისათვის საჭიროა 52-ბიტიანი კოდი.

იმ შემთხვევაში, თუ კოეფიციენტების შესაბამის კოდები დალაგდება სტრიქონული სკანირების თანმიმდევრობით, მაშინ აღნიშნული 71-ბიტიანი კოდია: 10000101001000011000010101000101100100010001010101000101001001010110 10. თუ სიმბოლოთა მიღებულ თანმიმდევრობას წინ დაემატება 1-ლ, მე-2, მე-3, მე-4 და მე-5 ეტაპებზე დადგენილ სიმბოლოთა მიმდევრობები, მაშინ მიიღება 103-ბიტიანი რიცხვი: 1011100101011 0011000101100011001010000101001000011000010101000101100100010001010101000101 0010010101 1010.

ამრიგად, შემოთავაზებული მეთოდის საფუძველზე დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტას უდანაკარგო ეკონომიური კოდირებისას მოცემულ შემთხვევაში საკმარისი აღმოჩნდა 103 ბიტი მაშინ, როდესაც ჰაფმანის კოდების გამოყენებისას საჭირო იყო 149 ბიტი. შესაბამისად, განხილული მეთოდის შემთხვევაში შეკუმშვის ფაქტორია 512/103≈4,97 მაშინ, როდესაც ჰაფმანის კოდების გამოყენების შემთხვევაში მისი მნიშვნელობაა 3,44. ამიტომ შემოთავაზებულმა მეთოდმა მოცემულ შემთხვევაში უზრუნველყო გამოსახულების ერთ ელემენტზე მოსული ბიტების რაოდენობის შემცირება 8 ბიტიდან 1,61 ბიტამდე (ჰაფმანის კოდის გამოყენების შემთხვევაში კი ეს მაჩვენებელი შემცირდა 8 ბიტიდან 2,33 ბიტამდე).

წარმოდგენილი მასალის ანალიზის საფუძველზე მოცემულ შემთხვევაში დგინდება, რომ დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების უდანაკარგო კოდირება შემოთავაზებული მეთოდის საფუძველზე გამოირჩევა მეტი ეფექტურობით იმავე მიზნით ჰაფმანის კოდების გამოყენებასთან შედარებით. მაგრამ ცალსახად იმის თქმა, რომ აღნიშნული კოდირება ყოველთვის ეფექტურია ჰაფმანის მეთოდთან შედარებით არ შეიძლება, რადგან ეს მაგალითი იყო მხოლოდ ერთი ტრანსფორმანტასათვის.

შემოთავაზებული მეთოდის ეფექტურობის დასადგენად საჭიროა მთლიანი 256x256 ფორმატის ფერადი გამოსახულების, როგორც სიკაშკაშის Y, ასევე ორი ფერსხვაობის C_b და C_r შემდგენების ამ მეთოდით კოდირება და მათი შედარება ჰაფმანის მეთოდით კოდირებულ გამოსახულებასთან.

1.3. უდანაკარგოდ კოდირებული წრფივი გარდასახვის ტრანსფორმანტების დეკოდირების ალგორითმი

წინა პარაგრაფში განხილულია რეალური გამოსახულების 8x8 ზომის ერთ-ერთი ფრაგმენტის ბლოკური კოდირების მაგალითი. შემუშავებული მეთოდი განხორციელებულია დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების ეტაპებად დამუშავებით. ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების 103-ბიტიანი ორობითი რიცხვის

(1011100101011001100010110001100101000010100100001100001010100010110010001000 101010100010100100101011010) საშუალებით სრულყოფილად (100%-ით) აღდგენის (დეკოდირების) ალგორითმის არსი მდგომარეობს შემდეგში:

1. გარდასახვის [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტების კოდირების მეთოდის მიხედვით 1-ლ ეტაპზე ხდება ტრანსფორმანტას F_1(0,0) კოეფიციენტის კოდირება 7-ბიტიანი ორობითი რიცხვით. ამიტომ, ვინაიდან აღნიშნული მიმდევრობის პირველ შვიდ სიმბოლოს (1011100) შეესაბამება ათობითი რიცხვი 92, ამიტომ დეკოდირებისას აღდგება კოეფიციენტი F_1(0,0)=92.

2. კოდირების მე-2 ეტაპზე ფორმირდება ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ [F_1(0,0)] კოეფიციენტის გარეშე წარმოდგენილი ტრასფორმანტა [F_2(u,v)] შეიცავს თუ არა მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს (1 ბიტი – 0 ან 1). მოცემულ მიმდევრობაში ამ ინფორმაციის აღმნიშვნელია მე-8 სიმბოლო 1, რაც ნიშნავს, რომ ტრანსფორმანტა არანულოვანია. [F_2(u,v)] ტრანსფორმანტა [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტასგან განსხვავდება მხოლოდ იმით, რომ იგი არ შეიცავს F_1(0,0) კოეფიციენტს.

3. კოდირების პროცესის მე-3 ეტაპზე 8x8 ზომის [F_2(u,v)] ტრანსფორმანტა დაიყოფა 4x4 ზომის 4 ბლოკად ისე, როგორც ეს [F_1(u,v)] ტრანსფორმანტაზეა ნაჩვენები, და ფორმირდება 3-ბიტიანი ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ მარჯვენა ზედა და ქვედა (მე-2 და მე-4 ბლოკები) და მარცხენა ქვედა (ბლოკი 3) ბლოკებში შემავალი ყველა კოეფიციენტი არის თუ არა ნულის ტოლი. აღსანიშნავია, იმ ბლოკებს, რომლებიც შეიცავენ მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს, ეწოდება ნულოვანი ბლოკები, ხოლო დანარჩენებს – არანულოვანი ბლოკები.

განსახილველ მიმდევრობაში აღნიშნული ინფორმაციის მატარებელია მომდევნო მე-9, მე-10 და მე-11 სიმბოლოები (010), რაც იმას ნიშნავს, რომ 8x8 ზომის [F_2(u,v)] ტრანსფორმანტას მე-2 და მე-4 ბლოკების ყველა კოეფიციენტი ნულის ტოლია, ხოლო მე-3 ბლოკის ყველა კოეფიციენტი არაა ნულის ტოლი: $F_1(0,4)=F_1(0,5)=F_1(0,6)=F_1(0,7)= F_1(1,4)=F_1(1,5)=F_1(1,6)=F_1(1,7)=F_1(2,4)=F_1(2,5)=F_1(2,6)=F_1(2,7)=F_1(3,4)=F_1(3,5)=F_1(3,6)=F_1(3,7)=F_1(4,4)=F_1(4,5)=F_1(4,6)=F_1(4,7)=F_1(5,4)=F_1(5,5)=F_1(5,6)=F_1(5,7)=F_1(6,4)=F_1(6,5)=F_1(6,6)=F_1(6,7)=F_1(7,4)=F_1(7,5)=F_1(7,6)=F_1(7,7)=0$.

ამრიგად, დეკოდირებისას აღდგება [$F_2(u,v)$] ტრანსფორმანტას მე-2 და მე-4 ბლოკების 32-ვე კოეფიციენტი.

4. მე-4 ეტაპზე ხორციელდება ოთხ ბლოკად დაყოფილი [$F_2(u,v)$] ტრანსფორმანტას თითოეული ბლოკის დაყოფა 4x4 ზომის 4 ქვებლოკად და თითოეული ქვებლოკისათვის (გარდა იმ ქვებლოკებისა, რომლებიც ეკუთვნიან ნულოვან ბლოკებს, და 1-ლ ბლოკში შემავალი ქვებლოკებისა, თუ დანარჩენი ბლოკებიდან ერთ-ერთი მაინც არაა ნულოვანი ბლოკი) ფორმირდება 4-ბიტიანი ინფორმაცია იმის შესახებ, რომ ქვებლოკებში შემავალი ყველა კოეფიციენტი არის თუ არა ნულის ტოლი.

წინა ეტაპის მსგავსად თითოეული ბლოკის ქვებლოკები დანომრილია ტრანსფორმანტას ბლოკების დანომვრის პრინციპით და იმ ქვებლოკებს, რომლებიც შეიცავენ მხოლოდ ნულის ტოლ კოეფიციენტებს, ეწოდებათ ნულოვანი ქვებლოკები, ხოლო დანარჩენებს – არანულოვანი ქვებლოკები.

ვინაიდან მე-3 ეტაპზე დადგინდა, რომ გარდა ტრანსფორმანტას 1-ლი ბლოკისა, არანულოვანია მე-3 ბლოკი, ამიტომ კოდირების პროცესში მხოლოდ მე-3 ბლოკის ქვებლოკებისათვის ფორმირდება 4-ბიტიანი კოდი, რომლის სიმბოლოებს წარმოდგენილ 103-ბიტიან რიცხვში უჭირავს მე-12, მე-13, მე-14 და მე-15 პოზიციები. აღნიშნული 4-ბიტიანი კოდია 1100, რაც დეკოდერისათვის იმას ნიშნავს, რომ მე-3 ბლოკის მხოლოდ მე-3 და მე-4 ქვებლოკებია ნულოვანი, ანუ მათში შემავალი ყველა კოეფიციენტი ნულის ტოლია: $F_1(6,0)= F_1(6,1)= F_1(7,0)= F_1(7,1)= F_1(6,2)= F_1(6,3)= F_1(7,2)= F_1(7,3)=0$.

ამრიგად, დეკოდირებისას აღდგება [$F_2(u,v)$] ტრანსფორმანტას მე-3 ბლოკის მე-3 და მე-4 ქვებლოკების რვავე კოეფიციენტი.

5. იმ არანულოვანი ბლოკის ქვებლოკებში ნულის ტოლი და არატოლი კოეფიციენტების დადგენა, რომელიც შეიცავს ნულოვან ქვებლოკებს.

წინა ეტაპზე ჩატარებული მსჯელობის საფუძველზე დეკოდირებისას დგინდება, რომ მე-3 ბლოკის მხოლოდ 1-ლი და მე-2 ქვებლოკებია არანულოვანი და მათი შესაბამისი ინფორმაციაა განსახილველი 103-ბიტიანი რიცხვის მომდენო 8-ბიტი (მე-16, მე-17, ..., 23-ე პოზიციები), რომელთაგან 1-ლი ქვებლოკისათვის კოდირების პროცესში

ფორმირდა 4-ბიტიანი კოდი 1100, ხოლო მე-2 ქვებლოკისათვის – ასევე 4-ბიტიანი კოდი 0101. შევნიშნავთ, რომ 1-ით აღნიშნულია ნულის არატოლი კოეფიციენტი, ხოლო 0-ით – ნულის ტოლი კოეფიციენტი.

მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე დეკოდერი ადგენს, რომ $F_1(4,0)\neq0$, $F_1(4,1)\neq0$, $F_1(4,3)\neq0$, $F_1(5,3)\neq0$ და $F_1(4,2)=F_1(5,0)=F_1(5,1)=F_1(5,2)=0$.

დეკოდირების შედეგად ამ ეტაპზე აღდგება მე-3 ბლოკის 1-ლი და მე-2 ქვებლოკების 4 კოეფიციენტი.

მაშასადამე, დეკოდირების პროცესის მე-5 ეტაპის დამთავრების შემდეგ $F_1(u,v)$ ტრანსფორმანტას აღდგენილი კოეფიციენტების რაოდენობაა 1 (I ეტაპი)+32 (III ეტაპი)+8 (IY ეტაპი)+4 (Y ეტაპი)=45, რის გამოც აღსადგენია დანარჩენი 19 კოეფიციენტი, რომელთა კოორდინატები ცნობილია.

6. მოცემულ 103-ბიტიან მიმდევრობაში 24-ე, 25-ე, ..., 32-ე პოზიციებზე არსებული სიმბოლოების ერთობლიობა (9-ბიტიანი კოდი) შეიცავს ინფორმაციას ტრანსფორმანტას 1-ლ ბლოკსა (3 ბიტი) და მე-3 ბლოკის 1-ლ (3 ბიტი) და მე-2 (3 ბიტი) ქვებლოკებში მაქსიმალური მნიშვნელობის კოეფიციენტების ამპლიტუდის კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობის შესახებ. მოცემულ მიმდევრობაში 9-ბიტიანი კოდია 100011001, რაც იმას ნიშნავს, რომ 1-ლი ბლოკის 1-ლი ქვებლოკის 3 კოეფიციენტის ამპლიტუდა წარმოდგენილია 4-ბიტიანი კოდებით, ამავე ბლოკის მე-2, მე-3 და მე-4 ქვებლოკების 4-4 კოეფიციენტისა (სულ 12 კოეფიციენტი) – 3-ბიტიანი კოდებით, ხოლო მე-3 ბლოკის 4 $F_2(4,0)$, $F_2(4,1)$, $F_2(4,3)$ და $F_2(5,3)$ კოეფიციენტისა – 1-ბიტიანი კოდებით.

7. დარჩენილი 19 კოეფიციენტის ნიშნების აღმნიშვნელი ინფორმაცია (19-ბიტიანი კოდი 0000000000000010011) მოცემულ 103-ბიტიან მიმდევრობაში გადანაწილებულია და შესაბამისი სიმბოლო ჩასმულია კოეფიციენტის ამპლიტუდის აღმნიშვნელი ორობითი რიცხვის წინ.

აღნიშნული 19-ბიტიანი კოდის ანალიზის საფუძველზე დგინდება, რომ $F_1(0,1)$, $F_1(0,2)$, $F_1(0,3)$, $F_1(1,0)$, $F_1(1,1)$, $F_1(1,2)$, $F_1(1,3)$, $F_1(2,0)$, $F_1(2,1)$, $F_1(2,2)$, $F_1(2,3)$, $F_1(3,0)$, $F_1(3,1)$, $F_1(3,2)$, $F_1(4,0)$ და $F_1(4,1)$ კოეფიციენტები უარყოფითია, ხოლო $F_1(3,3)$, $F_1(4,3)$ და $F_1(5,3)$ კოეფიციენტები – დადებითი. 103-ბიტიან მიმდევრობაში შესაბამისი 71-ბიტიანი რიცხვია – 01000010100100001100001010100010110010001000101010100010100100101011010.

8. დეკოდირების მოცემულ ეტაპზე ხდება 71-ბიტიანი მიმდევრობის ანალიზი წინა პუნქტებზე მიღებული შედეგების გათვალისწინებით.

ამ მიმდევრობის პირველი ხუთი სიმბოლო შეესაბამება $F_2(0,1)$ კოეფიციენტის ნიშანსა და მის ამპლიტუდურ მნიშვნელობას, შემდეგი ოთხი სიმბოლო – $F_2(0,2)$ კოეფიციენტის ნიშანსა და ამპლიტუდას და ასე შემდეგ 71-ბიტიანი მიმდევრობის ბოლო 2 სიმბოლო – $F_2(5,4)$ კოეფიციენტის ნიშანსა და ამპლიტუდას:

01000 – $F_2(0,1) = -8$; 0110 – $F_2(0,2) = -6$; 0001 – $F_2(0,3) = -1$; 01010 – $F_2(1,0) = -10$; 01000 – $F_2(1,1) = -8$; 0101 – $F_2(1,2) = -5$; 0001 – $F_2(1,3) = -1$; 0110 – $F_2(2,0) = -6$; 0100 – $F_2(2,1) = -4$; 0101 – $F_2(2,2) = -5$; 0001 – $F_2(2,3) = -1$; 0100 – $F_2(3,0) = -4$; 0101 – $F_2(3,1) = -5$; 0100 – $F_2(3,2) = -4$; 1001 – $F_2(3,3) = 1$; 01 – $F_2(4,0) = -2$; 01 – $F_2(4,1) = -2$; 10 – $F_2(4,3) = 1$; 10 – $F_2(5,3) = 1$.

ამრიგად, განხილული ალგორითმის საფუძველზე აღდგება დისკ-რეტული კოსინუსური გარდასახვის უდანაკარგოდ და ეკონომიურად კოდირებული ტრანსფორმანტას ყველა კოეფიციენტი, რომელთა ერთობლიობა წარმოადგენს $[F_1(u,v)]$ მატრიცას. მისი კოეფიციენტების დეკვანტირების შედეგად ფორმირებული $[F(u,v)]$ მატრიცის უკუგარდასახვით კი აღდგება გამოსახულების ფრაგმენტი $[f(x,y)]$.

1.4. ბლოკური კოდირების მეთოდის ეფექტურობა

გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების ბლოკური მეთოდით კოდირების ეფექტურების დასადგენად საჭიროა მთლიანი 256x256 ფორმატის ფერადი გამოსახულების როგორც სიკაშკაშის Y, ასევე ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენის ამ მეთოდით კოდირება და მიღებული შედეგების შედარება არსებულთან. ფერადი გამოსახულების შესაბამისი სიკაშკაშის შემდგენი $Y=0,2989xR+0,5866xG+0,1145xB$, ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენები – $C_r=0,5000xR-0,4184xG-0,0816xB$ და $C_b=-0,1688xR-0,3312xG+0,5000xB$, სადაც R, G და B გამოსახულების წითელი, მწვანე და ლურჯი შემდგენებია.

კომპაქტური კოდირების ბლოკური მეთოდის ეფექტურობის დადგენის მიზნით საცდელად შერჩეული იქნა ძალიან მცირე, მცირე,

საშუალო და მაღალი დეტალობით გამორჩეული 256x256 ფორმატის ფერადი გამოსახულებები ”ფონი”, “ლენა”,”ალუბლები” და “ზამთარი” (სურ. 1). სიკაშკაშის შემდგენის ფრაგმენტების რაოდენობაა 32x32=1024, ხოლო თითოეული ფერსხვაობითი შემდგენისათვის – 16x16=256.

ა

ბ

გ

დ

ე

ვ

ზ

თ

ი

კ

ლ

მ

ნ ო პ

ჟ რ ს

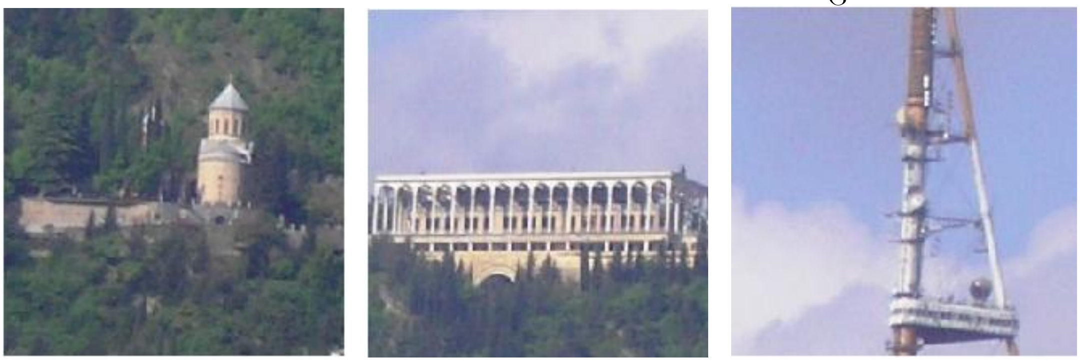
ტ უ ფ

ქ ღ ყ

შ ჩ ც



ძ წ ჭ

სურ. 1. ორიგინალური საცდელი გამოსახულებები: “ლენა” (ა), “ბიონსე” (ბ), “ბუნება” (გ), “ნაგაზი” (დ), “თიბისი” (ე), “კატა” (ვ), “ციხესიმაგრე” (ზ), “ბავშვები” (თ), “ალუბლები” (ი), “კროსი” (კ), “ფერმა” (ლ), “პარკი” (მ), “კენკრა” (ნ), “დაისი” (ო), “ზამთარი” (პ), “გარნიტური” (ჟ), “შროშანი” (რ), “მთები” (ს), “ტბა” (ტ), “მაღაზია” (უ), “კარუსელი” (ფ), “შემოდგომა” (ქ), “კოშკი” (ღ), “კოლიზეუმი” (ყ), “ტექსტი” (შ), “ფონი” (ჩ), “ღრუბელი” (ც), “მამადავითი” (ძ), “ფუნიკულორი” (წ) “ტელეანძა” (ჭ).

ცხრილში 1 მოყვანილია კოდირების არსებული და შემოთავაზებული ვარიანტების გამოყენებისას საჭირო შესაბამისი ბიტების რაოდენობები როგორც გამოსახულებების Y, C_r, C_b შემდგენებისათვის, ასევე სრული სიგნალისათვის. მიღებული შედეგებიდან გამომდინარეობს შემდეგი: ძალიან მცირე დეტალობის გამოსახულების (“ფონი”) შემოთავაზებული მეთოდით კოდირებისას მიიღწევა უფრო მეტი კომპრესიის ფაქტორი არსებულ მეთოდთან შედარებით; მცირე და საშუალო დეტალობის გამოსახულებების (“ლენა”, “ალუბლები”) კოდირებისას შემოთავაზებული მეთოდით უფრო მეტი კომპრესიის ფაქტორი არსებულ მეთოდთან შედარებით მიიღება სიკაშკაშის შემდგენისათვის, ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენებისათვის – უარესი შედეგი; მაღალი დეტალობის გამოსახულების (“ზამთარი”) შემოთავაზებული მეთოდით კოდირებისას სამივე შემდგენისათვის შედეგები უარესია. არსებული და შემოთავაზებული ვარიანტებიდან საუკეთესოს შერჩევით (კოდირების პროცესის ადაპტაციით) პირველი სამი გამოსახულების შესაბამისი სრული სიგნალისათვის მიიღება უკეთესი შედეგი არსებულთან შედარებით. ცხრილის მონაცემებში გათვალისწინებულია შეხამებული კოდირების შემთხვევაში კოდირების ვარიანტის შესახებ დამატებითი ერთი საინფორმაციო სიმბოლოს გამოყენების აუცილებლობა.

ცხრილი 1. ფერადი გამოსახულებების კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა

საცდელი გამოსახუ-ლებები	არსებული მეთოდით				შემოთავაზებული მეთოდით				შეხამებული მეთოდით
	Y	C_r	C_b	სულ	Y	C_r	C_b	სულ	სულ
"ფონი"	8307	1164	1180	10651	**5613**	**879**	**914**	**7406**	**7407**
"ლენა"	55771	**4108**	**4323**	64202	**55287**	5221	5566	66074	**63719**
"ალუბ-ლები"	64684	**7524**	**5174**	77382	**64603**	7612	6004	78219	**77302**
"ზამთა-რი"	**66563**	**3017**	**4286**	**73866**	66617	4215	4901	75733	**73867**

თუ გამოსახულების ერთ ელემენტზე დახარჯული ბიტების რაოდენობას ავღნიშნავთ P-თი, მაშინ კოდირების არსებული და შემოთავაზებული მეთოდების გამოყენებისას იგი გამოითვლება გამოსახულებისათვის დახარჯული სიმბოლოების ჯამური რაოდენობების გაყოფით საცდელი გამოსახულებების ელემენტების რაოდენობაზე (256x256=65536). ვინაიდან საწყისი გამოსახულების თითოეული ელემენტის სამივე შემდგენიდან ყოველი მათგანისათვის საჭიროა 8 ბიტი, ამიტომ სრული სიგნალის თითოეული ელემენტისათვის დაიხარჯება 24 ბიტი, რის გამოც კომპრესიის ფაქტორი F=24/P (ცხრილი 2).

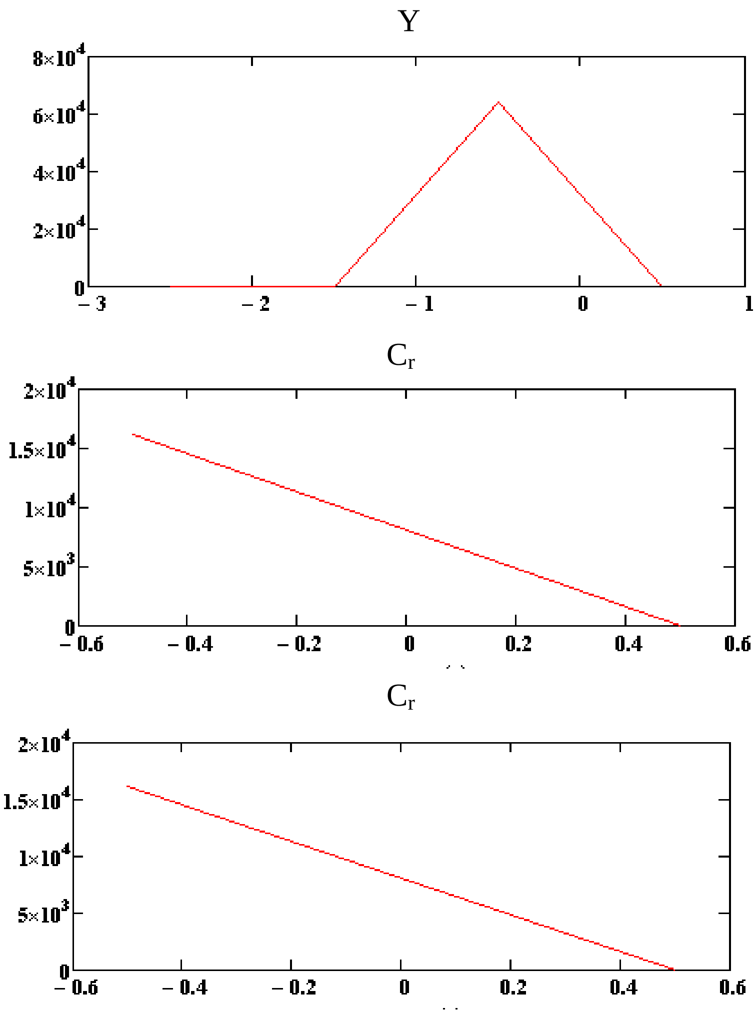
ცხრილი 2. ფერადი გამოსახულებების კომპაქტური ბლოკური კოდირების ეფექტურობა

საცდელი გამოსახულებები	არსებული მეთოდით		შემოთავაზებული მეთოდით		შეხამებული მეთოდით	
	P	F	P	F	P	F
"ფონი"	0.163	147.24	**0.113**	**212.39**	**0.113**	**212.39**
"ლენა"	0.980	24.49	1.008	23.80	**0.972**	**24.69**
"ალუბლები"	1.181	20.32	1.194	20.10	**1.180**	**20.34**
"ზამთარი"	**1.127**	**21.30**	1.156	20.76	**1.127**	**21.30**

თავი 2. გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების ზონური მეთოდები

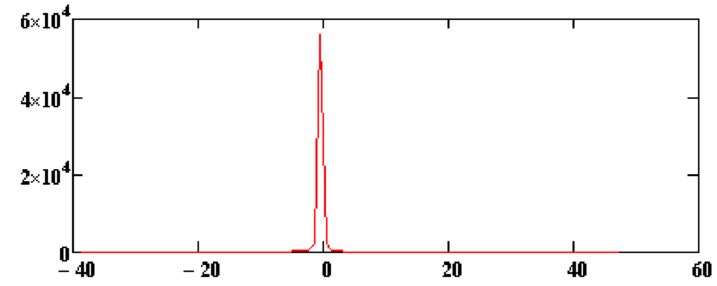
2.1. ფერად გამოსახულებათა დაკვანტული არამთავარი კოეფიციენტების ჰისტოგრამები

პროგრამა MathCad-ის საშუალებით აგებულია ტრანსფორმანტების დაკვანტული არამთავარი კოეფიციენტების ჰისტოგრამები საცდელი ფერადი ძალიან მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობით გამორჩეული გამოსახულებების “ფონი” (ნახ. 2), “ლენა” (ნახ. 3), “ალუბლები” (ნახ. 4) და “ზამთარი” (ნახ. 5) სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენებისათვის.

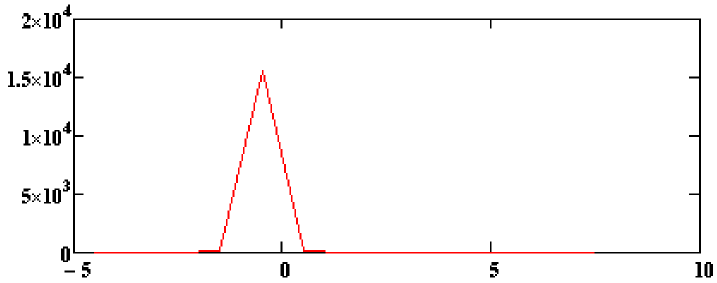


ნახ. 2. საცდელი ფერადი გამოსახულების “ფონი” შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ჰისტოგრამები.

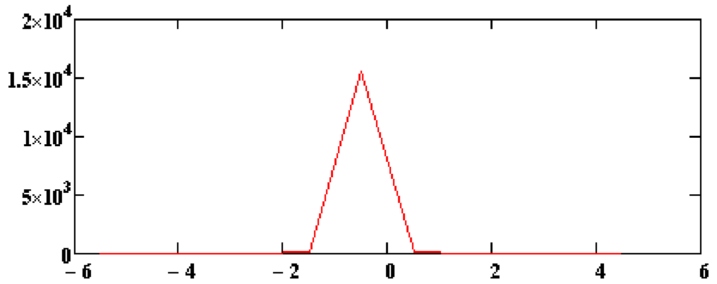
Y



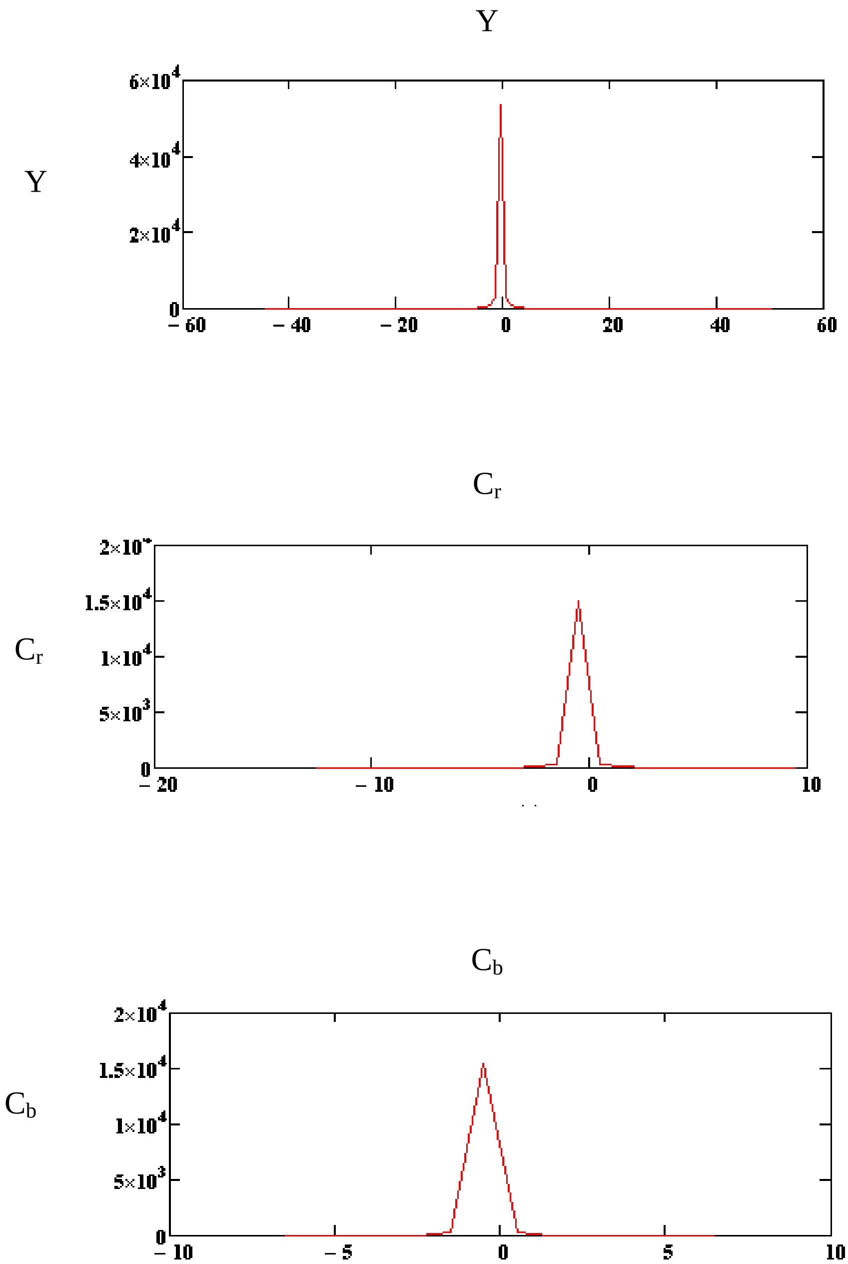
C_r



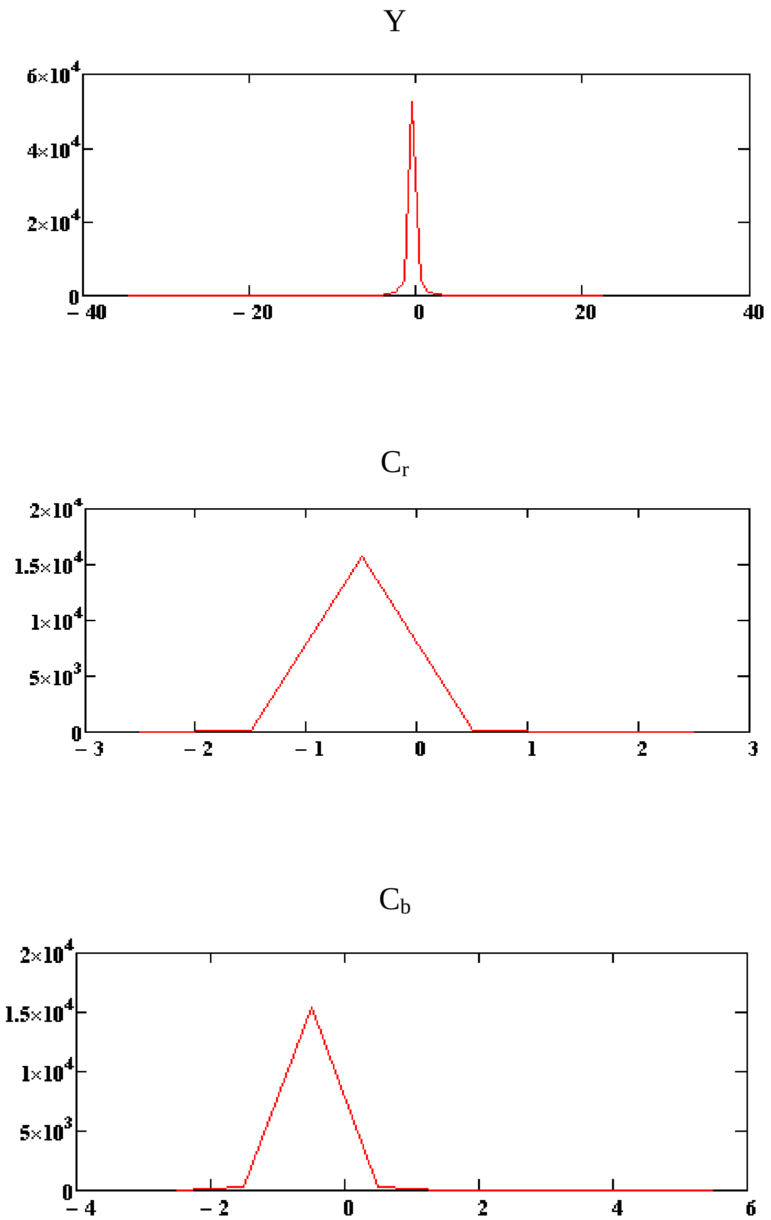
C_b



ნახ. 3. საცდელი ფერადი გამოსახულების “ლენა” შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ჰისტოგრამები.



ნახ. 4. საცდელი ფერადი გამოსახულების “ალუბლები” შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ჰისტოგრამები.



ნახ. 5. საცდელი ფერადი გამოსახულების “ზამთარი” შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ჰისტოგრამები.

წარმოდგენილი ჰისტოგრამებიდან ნათლად ჩანს, რომ დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მნიშვნელობები სამივე შემდგენისათვის ნულის მიდამოშია განლაგებული, რაც მიუთითებს მათი უდანაკარგო კომპრესიის ეფექტურობაზე.

2.2. გამოსახულებათა გადასახული ტრანსფორმატების ზონური კოდირების ალგორითმი

ფერადი NxN ზომის გამოსახულებების კომპრესიის (ეფექტური კოდირების) მიზნით საერთაშორისო JPEG და MPEG რეკომენდაციების შესაბამისად ხდება გამოსახულებების სიკაშკაშის Y შემდგენის NxN რაოდენობის დისკრეტული ანათვლების (ელემენტების) და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების (N/2)x(N/2) რაოდენობის ელემენტების მასივების 8x8 ზომის ფრაგმენტების $f(x,y)_{x,y=0,1,\ldots,7}$ ელემენტებისაგან შედგენილი მატრიცების წრფივი დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვა, რის შედეგადაც მიღებული იმავე ზომის ტრანსფორმანტების დაკვანტვის შემდეგ ფორმირდება მთავარი $F(u,v)_{u,v=0}$ და არამთავარი $F(u,v)_{u,v=1,2,\ldots,7}$ კოეფიციენტების მასივი. ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების კომპაქტური უდანაკარგო კოდირების მიზნით აღნიშნული რეკომენდაციებით გათვალისწინებულია გამოსახულების ყველა ფრაგმენტის შესაბამისი მთავარი კოეფიციენტების ერთობლიობის კოდირება ჰაფმანის კოდების გამოყენებით, ხოლო არამთავარი კოეფიციენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალურად სკანირებული ერთგანზომილებიანი მიმდევრობის კომპაქტური კოდირება ხორციელდება ამ მიზნით შედგენილი ჰაფმანის ცხრილების საფუძველზე [19, 21].

აღსანიშნავია, რომ გამოსახულებების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვისა და ამ გზით ფორმირებული ტრანსფორმანტების დაკვანტვა თავისთავად იწვევს ნაწილობრივ დანაკარგებს, რაც უმნიშვნელოა აღდგენილი გამოსახულებების ხარისხობრივი მაჩვენებლების თვალსაზრისით, რის გამოც აღნიშნული დანაკარგები დაშვებულია ზემოაღნიშნული რეკომენდაციებით. რაც შეეხება უდანაკარგო კოდირებას ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებით, გამოსახულებათა დამუშავების ამ ეტაპზე მიიღწევა მონაცემთა (გარდასახვის დაკვანტული ტრანსფორმანტების) უდანაკარგო კომპრესია [1, 2, 3, 4, 14, 21].

აღნიშნული ორგანზომილებიანი გარდასახვის დაკვანტული [F(u,v)] ტრანსფორმანტები მიიღება შემდეგი მატრიცების

გადამრავლებით: $[F(u,v)]= ([DCT]x[f(x,y)]x[DCT]^T)/Q$, სადაც $[DCT]^T$ დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის 8x8 ზომის საბაზო [DCT] მატრიცის ტრანსპონირებული მატრიცაა, ხოლო Q – იმავე ზომის დაკვანტვის მატრიცაა [49, 50].

უკუგარდასახვა (გამოსახულების ფრაგმენტის აღდგენა) კი ხდება შემდეგი უკუგარდაქმნის საფუძველზე: $[f(x,y)]=Q[DCT]^{-1}x[F(u,v)]x[DCT]^{-1T}$.

ამ გამოსახულებაში “-1” უკუმატრიცის აღმნიშვნელია.

ტრანსფორმანტას არამთავარი დაკვანტული $F(u,v)_{u,v=1,2,\ldots,7}$ კოეფიციენტების ერთობლიობის წარმოდგენა შეიძლება შემდეგი მატრიცის სახით:

F(u,v)=

-	F(0,1)	F(0,2)	F(0,3)	F(0,4)	F(0,5)	F(0,6)	F(0,7)
F(1,0)	F(1,1)	F(1,2)	F(1,3)	F(1,4)	F(1,5)	F(1,6)	F(1,7)
F(2,0)	F(2,1)	F(2,2)	F(2,3)	F(2,4)	F(2,5)	F(2,6)	F(2,7)
F(3,0)	F(3,1)	F(3,2)	F(3,3)	F(3,4)	F(3,5)	F(3,6)	F(3,7)
F(4,0)	F(4,1)	F(4,2)	F(4,3)	F(4,4)	F(4,5)	F(4,6)	F(4,7)
F(5,0)	F(5,1)	F(5,2)	F(5,3)	F(5,4)	F(5,5)	F(5,6)	F(5,7)
F(6,0)	F(6,1)	F(6,2)	F(6,3)	F(6,4)	F(6,5)	F(6,6)	F(6,7)
F(7,0)	F(7,1)	F(7,2)	F(7,3)	F(7,4)	F(7,5)	F(7,6)	F(7,7)

აღნიშნულ მატრიცაში კოეფიციენტი, რომლის კოორდინატებია (0,0), გამოტოვებულია, ვინაიდან ის მიეკუთვნება მთავარი კოეფიციენტების ჯგუფს, რომლის უდანაკარგო კოდირება ხდება არამთავარი კოეფიციენტების კოდირების პროცესისაგან დამოუკიდებლად [14, 19, 21, 51].

არამთავარი კოეფიციენტების უდანაკარგო კოდირებამდე განსახორციელებელი მათი ზიგზაგისებური სკანირების ერთ-ერთი ვარიანტი (ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირება) წარმოდგენილია მე-3 ცხრილის სახით.

მე-3 ცხრილიდან ჩანს, რომ სკანირების შედეგად არამთავარი კოეფიციენტების ორგანზომილებიანი მასივი წარმოდგება შემდეგი ერთგანზომილებიანი მიმდევრობის სახით: F(0,1), F(1,0), F(2,0), F(1,1), F(0,2), F(0,3), F(1,2), F(2,1), F(3,0), F(4,0), F(3,1), F(2,2), F(1,3), F(0,4), F(0,5), F(1,4), F(2,3), F(3,2), F(4,1), F(5,0), F(6,0), F(5,1), F(4,2), F(3,3), F(2,4), F(1,5), F(0,6), F(0,7), F(1,6), F(2,5), F(3,4), F(4,3), F(5,2), F(6,1), F(7,0), F(7,1), F(6,2), F(5,3), F(4,4), F(3,5), F(2,6), F(1,7), F(2,7), F(3,6), F(4,5), F(5,4), F(6,3), F(7,2), F(7,3), F(6,4), F(5,5), F(4,6), F(3,7), F(4,7), F(5,6), F(6,5), F(7,4), F(7,5), F(6,6), F(5,7), F(6,7), F(7,6), F(7,7).

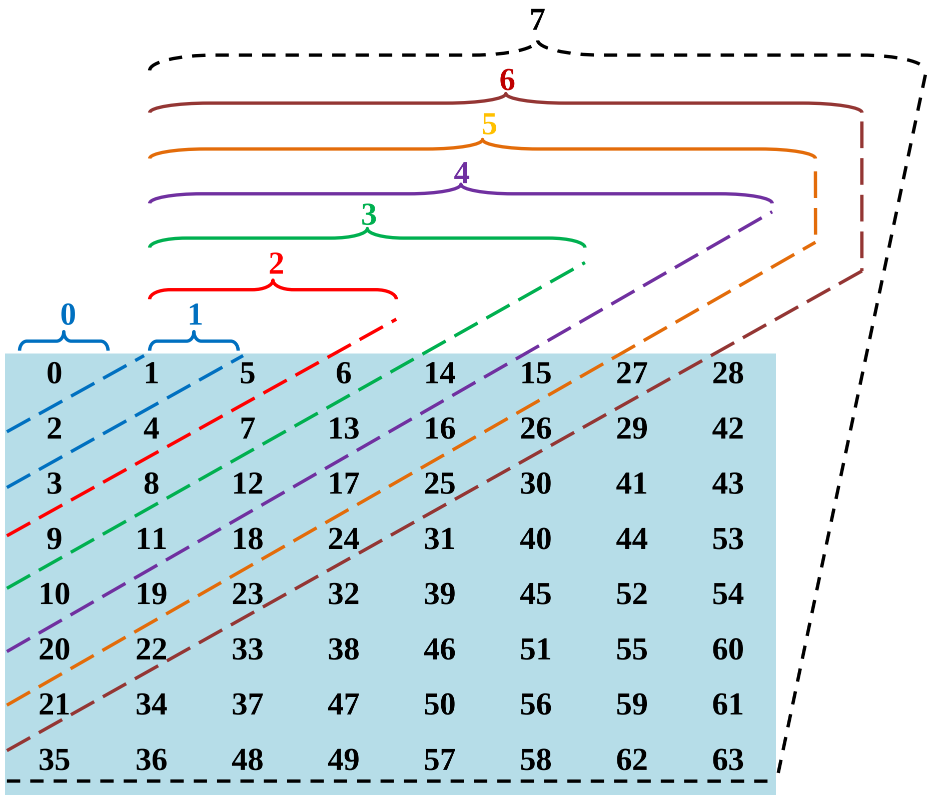
ცხრილი 3. ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირების წესი

-	1	5	6	14	15	27	28
2	4	7	13	16	26	29	42
3	8	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების ზიგზაგისებური სკანირების შემდეგ იმ კოეფიციენტებს, რომელთა შორის არ არსებობს თუნდაც ერთი ნული, სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენებისათვის შედგენილი ჰაფმანის ცხრილების მიხედვით შეუსაბამებენ სხვადასხვა სიგრძის ორობით კოდს, ხოლო ნულის ან ნულების არსებობის შემთხვევაში ბოლო ნულის შემდგომი კოეფიციენტის კოდირებას ახორციელებენ წინა ნულთან (ან ნულებთან) ერთად ასეთი შემთხვევისათვის შედგენილი ჰაფმანის სპეციალური ცხრილის მიხედვით. სკანირებულ მიმდევრობაში ნულის არატოლი კოეფიციენტების კოდირების დამთავრების შემდეგ კი ფორმირდება ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების კოდირების დამთავრების აღმნიშვნელი კოდური ჯგუფი EOB (end of blok - ბლოკის დასასრული). სიკაშკაშის შემდგენისათვის იგი წარმოადგენს ოთხთანრიგა ორობით რიცხვს 1010, ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენებისათვის – ორთანრიგა რიცხვს 00 [19, 21].

გარდასახვის არამთავარი კოეფიციენტების უდანაკარგო კოდირების ეფექტურობის გაუმჯობესების (კომპრესიის ფაქტორის ამაღლების) მიზნით შემოთავაზებულია ტრანსფორმანტების არამთავარი $F(u,v)_{u,v=1,2,\ldots,7}$ კოეფიციენტების კოდირების ეგრეთ წოდებული ზონური მეთოდი [50, 51].

კოდირების დასაწყისში სიკაშკაშის შემდგენის შესაბამისი ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების მასივი იყოფა რვა (0-დან 7-ის ჩათვლით) ზონად (ნახ. 6), ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენებისა – ოთხ (0-დან 3-ის ჩათვლით) ზონად (ნახ. 7). აღსანიშნავია, რომ ზონებად დაყოფა ხორციელდება სკანირების ზემოთ აღნიშნული პრინციპის შენარჩუნებით.

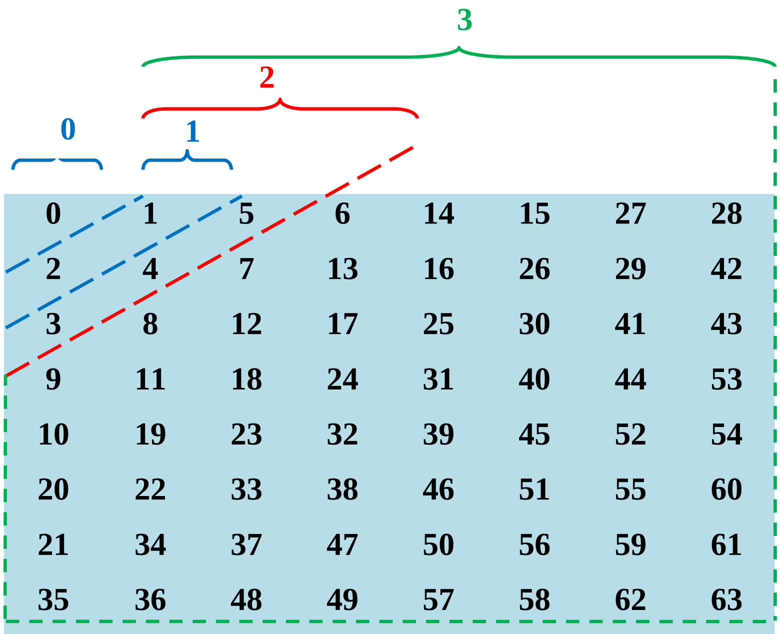


0	1	5	6	14	15	27	28
2	4	7	13	16	26	29	42
3	8	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

ნახ. 6. ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ზონების განაწილების პრინციპი ფერადი გამოსახულების სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის

ზიგზაგ-სკანირების შედეგად ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების ორგანზომილებიანი მასივი დალაგდება ერთგანზომილებიანი მასივის სახით ნახ. 6-ზე და ნახ. 7-ზე კოეფიციენტებისათვის მინიჭებული ნომრების ზრდადი თანმიმდევრობით [52].

არამთავარი კოეფიციენტების ნომრების ზონებში განაწილება, მათი ზიგზაგ-სკანირების შემდეგ გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი (C_r და C_b) შემდგენებისათვის ნაჩვენებია მე-4 და მე-5 ცხრილებში.



0	**1**	**5**	**6**	**14**	**15**	**27**	**28**
2	**4**	**7**	**13**	**16**	**26**	**29**	**42**
3	**8**	**12**	**17**	**25**	**30**	**41**	**43**
9	**11**	**18**	**24**	**31**	**40**	**44**	**53**
10	**19**	**23**	**32**	**39**	**45**	**52**	**54**
20	**22**	**33**	**38**	**46**	**51**	**55**	**60**
21	**34**	**37**	**47**	**50**	**56**	**59**	**61**
35	**36**	**48**	**49**	**57**	**58**	**62**	**63**

ნახ. 7. ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ზონების განაწილების პრინციპი ფერადი გამოსახულების ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენებისათვის

როგორც მე-4 და მე-5 ცხრილებიდან ჩანს, სიკაშკაშის შემ-დგენისათვის გამოყენებულია 8-ზონიანი, ხოლო ფერსხვაობითი შემდგე-ნებისათვის – 4-ზონიანი კოდირება. ფერსხვაობითი შემდგენებისათვის მხოლოდ 4 ზონის გამოყენება საკმარისია იმის გათვალისწინებით, რომ უმრავლესი გამოსახულებების ფერსხვაობითი შემდგენების შესაბამისი სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების უმრავლესობა, როგორც წესი, ნულის ტოლია (ნულოვანია). იმის გამო, რომ გამოსახულებების Y შემდგენის ტრანსფორმანტებისათვის გამოყენებულია 8 ზონა, ხოლო ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების ტრანსფორმანტებისათვის 4 ზონა, ამიტომ ზონების ნომრების კოდირებისათვის პირველ შემთხვევაში საჭიროა 3 ბიტი, ხოლო მეორე შემთხვევაში – 2 ბიტი.

ცხრილი 4. ტრანსფორმანტების სკანირებული არამთავარი კოეფიციენტების განაწილება ზონებში გამოსახულებების Y შემდგენისათვის

ზონის ნომერი	სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების ნომრები
0	ტრანსფორმანტები ნულის ტოლი (ნულოვანი) არამთავარი კოეფიციენტებით
1	1, 2
2	1, 2, 3, 4, 5
3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
4	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14
5	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20
6	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27
7	ყველა კოეფიციენტი 1-დან 63-ის ჩათვლით

ცხრილი 5. ტრანსფორმანტების სკანირებული არამთავარი კოეფიციენტების განაწილება ზონებში გამოსახულებების C_r და C_b შემდგენებისათვის

ზონის ნომერი	სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების ნომრები
0	ტრანსფორმანტები ნულის ტოლი (ნულოვანი) არამთავარი კოეფიციენტებით
1	1, 2
2	1, 2, 3, 4, 5
3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63

ამის შემდგომ ხდება ზონების დაყოფა მინიზონებად მე-6 ცხრილში ნაჩვენები წესით [52].

ცხრილი 6. მინიზონებში შემავალი ტრანსფორმანტების სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების ნომრები გამოსახულებების შემდგენებისათვის

მინიზონის ნომერი	სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების ნომრები	მინიზონის ნომერი	სკანირებული მიმდევრობის კოეფიციენტების ნომრები
Y			
2.1	3	5.2	18, 19, 20
2.2	4, 5	6.1	21, 22, 23, 24
3.1	6, 7	6.2	25, 26, 27
3.2	8, 9	7.1	28, 29, 30
4.1	10, 11	7.2	31, 32, 33, 34, 35
4.2	12, 13, 14	7.3	36, 37, 38, 39, 40, 41, 42
5.1	15, 16, 17	7.4	43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63
C_r და C_b			
2.1	3, 4	3.1	6, 7
2.2	5	-	-

შევნიშნოთ, რომ ზონებსა და მინიზონებში კოეფიციენტების ნომრების განაწილების პრინციპები დადგენილია ექსპერიმენტულად 1.4 პარაგრაფში მოყვანილი 256x256 ფორმატის (N=256) საცდელი გამოსახულებებისათვის (იხ. დანართი 1).

2.3. გამოსახულებათა ტრანსფორმატების ზონური კოდირების ეფექტურობის შეფასება

გამოსახულებათა კომპაქტური კოდირების შემოთავაზებული ზონური მეთოდით კოდირების ეფექტურების დასადგენად, ისევე როგორც ბლოკური მეთოდით კოდირებისას, საჭიროა 256x256 ფორმატის ფერადი გამოსახულების როგორც სიკაშკაშის Y, ასევე ფერსხვაობითი C_b და C_r შემდგენების ზონური მეთოდით კოდირება და

მიღებული შედეგების შედარება არსებული მეთოდით გამოსახულებათა კოდირების შედეგებთან (იხ. § 1.4).

წინა პარაგრაფში მოცემული საცდელი გამოსახულებები უკვე დამუშავებულია არსებული მეთოდის გამოყენებით. ამიტომ შეიძლება მათი შედეგების შედარება შემოთავაზებული ზონური კოდირების მეთოდით მიღებულ შედეგებთან.

მე-7 ცხრილში მოყვანილია კოდირების არსებული, ხოლო მე-8 ცხრილში შემოთავაზებული ვარიანტების შესაბამისი საჭირო ბიტების რაოდენობები როგორც გამოსახულებების Y, C_r და C_b შემდგენებისათვის, ასევე სრული სიგნალისათვის.

ცხრილი 7. საცდელი გამოსახულებების კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა მათი არსებული (ჰაფმანის) მეთოდით კოდირებისას

საცდელი გამოსახულებები	არსებული მეთოდით			
	Y	Cr	Cb	ჯამური
1	2	3	4	5
“ლენა”	55771	4108	4323	64202
“ბიონსე”	52668	4046	4597	61311
“ბუნება”	69692	2756	3160	75608
“ნაგაზი”	52845	2215	2598	57658
“თი-ბი-სი”	44978	1220	1321	47519
“კატა”	61743	3030	3692	68465
“ციხესიმაგრე”	62916	1891	3534	68341
“ბავშვები”	82773	4131	5711	92615
“ალუბლები”	64684	7524	5174	77382
“კროსი”	94288	5921	6142	106351
“ფერმა”	76646	3423	3961	84030
“პარკი”	62080	5440	8874	76394
“კენკრა”	104691	4700	3221	112612
“დაისი”	29594	5503	3375	38472
“ზამთარი”	66563	3017	4286	73866
“გარნიტური”	44381	3582	3099	51062

ცხრილი 7. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5
“შროშანი”	80953	5460	9310	95723
“მთები”	16811	1655	1627	20093
“ტბა”	35982	3219	3108	42309
“მაღაზია”	68379	5052	3387	76818
“კარუსელი”	49322	4889	7952	62163
“შემოდგომა”	103086	3118	3998	110202
“კოშკი”	77958	2651	2779	83388
“კოლიზეუმი”	79561	3360	4039	86960
“ტექსტი”	39484	1966	1959	43409
“ფონი”	8307	1164	1180	10651
“ღრუბელი”	22520	2076	2305	26901
“მამადავითი”	43326	2047	2649	48022
“ფუნიკულორი”	39769	1758	2681	44208
“ტელეანძა”	23863	1988	2472	28323

ცხრილი 8. საცდელი გამოსახულებების კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა მათი შემოთავაზებული ზონური მეთოდით კოდირებისას

საცდელი გამოსახულებები	შემოთავაზებული მეთოდით			
	Y	Cr	Cb	ჯამური
1	2	3	4	5
“ლენა”	57654	4167	4439	66260
“ბიონსე”	54680	4111	4743	63534
“ბუნება”	72746	**2749**	**3078**	78573
“ნაგაზი”	54257	**2110**	**2534**	58901
“თი-ბი-სი”	45460	**758**	**878**	**47096**
“კატა”	64280	**2863**	3975	71118
“ციხესიმაგრე”	64843	**1633**	3587	70063
“ბავშვები”	86367	4193	6015	96575
“ალუბლები”	67513	8338	5352	81203

ცხრილი 8. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5
“კროსი”	98272	7097	7470	112839
“ფერმა”	79971	**3398**	3975	87344
“პარკი”	64718	6563	14029	85310
“კენკრა”	112228	5989	4097	122314
“დაისი”	29535	7102	3285	39922
“ზამთარი”	68390	2995	4457	75842
“გარნიტური”	44932	3584	**3009**	51525
“შროშანი”	86196	6687	14808	107691
“მთები”	**16294**	**1287**	**1232**	**18813**
“ტბა”	**35804**	3730	**2927**	42461
“მაღაზია”	70272	6979	3477	80728
“კარუსელი”	51258	6992	12496	70746
“შემოდგომა”	110153	**3056**	4074	117283
“კოშკი”	81586	**2593**	**2685**	86864
“კოლიზეუმი”	82904	**3333**	4062	90299
“ტექსტი”	**38877**	**1771**	**1764**	**42412**
“ფონი”	**4910**	**658**	**676**	**6244**
“ღრუბელი”	**21949**	**1866**	**2138**	**25953**
“მამადავითი”	43761	**1805**	**2613**	48179
“ფუნიკულორი”	40469	**1442**	**2571**	44482
“ტელეანძა”	**23102**	**1730**	**2280**	**27112**

მე-8 ცხრილში წითლად არის გამოყოფილი ის მნიშვნელობები, რომლებიც საუკეთესოა არსებულ მეთოდთან შედარებით. მე-7 და მე-8 ცხრილებში წარმოდგენილი მონაცემებიდან გამომდინარეობს შემდეგი:

– მიუხედავად იმისა, რომ ზოგი გამოსახულებისათვის შემოთავაზებული მეთოდით კოდირება ზოგიერთი შემდეგნისათვის არის უფრო ეფექტური, მთლიანობაში იგი არ იძლევა დადებით შედეგს (“ბუნება”, “ნაგაზი”, “კატა”, “ციხესიმაგრე”, “ფერმა”, “დაისი”,

“ზამთარი”, “გარნიტური”, “ტბა”, “შემოდგომა”, “კოშკი”, “კოლიზეუმი”, “მამადავითი” და “ფუნიკულიორი”).

– ზოგიერთი გამოსახულებისათვის შემოთავაზებული ზონური მეთოდით კოდირება როგორც მთლიანად გამოსახულების, ასევე მისი არც ერთი შემდგენისათვის არ აღმოჩნდა ეფექტური (“ლენა”, “ბიონსე”, ბავშვები”, “ალუბლები”, “კროსი”, “პარკი”, “კენკრა”, “შროშანი”, “მაღაზია” და “კარუსელი”).

– შემოთავაზებული ზონური მეთოდით კოდირება ეფექტური აღმოჩნდა ისეთი გამოსახულებებისათვის, სადაც დეტალების რაოდენობა მცირეა, არ არსებობს მკვეთრი გადასვლები (კონტურები) და გამოსახულება თითქმის ერთფეროვანია (არ შეიცავს ფერთა დიდ გამას). ასეთი გამოსახულებებია: “თი-ბი-სი”, “მთები”, “ტექსტი”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა”.

მე-9 ცხრილში მოცემულია განხილული საცდელი გამოსახულებების გარდასახვის არამთავარი კოეფიციენტების კოდირების არსებული და შემოთავაზებული ზონური კოდირების ეფექტურობის პარამეტრები.

ეფექტურობის პარამეტრები ფასდება ისევე როგორც § 1.4-ში.

ცხრილი 9. საცდელი ფერად გამოსახულებათა კომპრესიის ეფექტურობა

საცდელი გამოსახულებები	არსებული მეთოდით		ზონური მეთოდით	
	P	F	P	F
1	2	3	4	5
“ლენა”	0.980	24.499	1.011	23.738
“ბიონსე”	0.936	25.654	0.969	24.756
“ბუნება”	1.154	20.803	1.199	20.018
“ნაგაზი”	0.880	27.279	0.899	26.704
“თი-ბი-სი”	0.725	33.100	0.719	33.397
“კატა”	1.045	22.973	1.085	22.116
“ციხესიმაგრე”	1.043	23.015	1.069	22.449
“ბავშვები”	1.413	16.983	1.474	16.286
“ალუბლები”	1.181	20.326	1.239	19.370

ცხრილი 9. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5
“კროსი”	1.623	14.789	1.722	13.939
“ფერმა”	1.282	18.718	1.333	18.008
“პარკი”	1.166	20.589	1.302	18.437
“კენკრა”	1.718	13.967	1.866	12.859
“დაისი”	0.587	40.883	0.609	39.398
“ზამთარი”	1.127	21.293	1.157	20.739
“გარნიტური”	0.779	30.803	0.786	30.526
“შროშანი”	1.461	16.431	1.643	14.605
“მთები”	0.307	78.279	**0.287**	**83.605**
“ტბა”	0.646	37.176	0.648	37.043
“მაღაზია”	1.172	20.475	1.232	19.484
“კარუსელი”	0.949	25.302	1.079	22.233
“შემოდგომა”	1.682	14.273	1.790	13.411
“კოშკი”	1.272	18.862	1.325	18.107
“კოლიზეუმი”	1.327	18.087	1.378	17.418
“ტექსტი”	0.662	36.234	**0.647**	**37.085**
“ფონი”	0.163	147.673	**0.095**	**251.900**
“ღრუბელი”	0.410	58.469	**0.396**	**60.604**
“მამადავითი”	0.733	32.753	0.735	32.646
“ფუნიკულორი”	0.675	35.579	0.679	35.360
“ტელეანძა”	0.432	55.533	**0.414**	**58.014**

თავი 3. გამოსახულებათა კომპაქტური ზონური კოდირების ეფექტურობის გამოკვლევა ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების სტატისტიკური მახასაითებლების გათვალისწინებით

3.1. დისკრეტულ კოსინუსური გარდასახვის სივრცეში ნულოვანი და არანულოვანი ტრანსფორმანტების არსებობის გათვალისწინება

ზონებსა და მინიზონებში კოეფიციენტების განაწილების პრინციპი შეიძლება შეიცვალოს ისეთი გამოსახულებებისათვის, რომლებსაც გააჩნიათ ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების ისეთი რაოდენობა, რომელიც ზონების აღნიშვნისათვის ჯამში აღმოჩნდება უფრო მომგებიანი (ნაკლები ბიტების რაოდენობა) და გააუმჯობესებს კომპრესიის ფაქტორს. ვინაიდან საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის შემდგენის ზომაა 256x256, ხოლო თითოეული ფერსხვაობითი შემდგენისა – 128x128, ამიტომ სიკაშკაშის შემდგენისათვის 8x8 ზომის ფრაგმენტების რაოდენობაა 1024 ($N_{yფრ}$=1024), ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენების იმავე ზომის ფრაგმენტებისა – 256 ($N_{Crbფრ}$=256). თუ N_0-ით აღინიშნება ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების რაოდენობა, N-ით – დანარჩენი ტრანსფორმანტების რაოდენობა და $N_ზ$-ით – ზონების რაოდენობა, მაშინ ზონების კოდირებისათვის გამოყენებული ბიტების რაოდენობის ეკონომია შეიძლება განისაზღვროს შემდეგი სისტემის ამოხსნით:

$$\begin{cases} N_0+N=N_{ფრ}, \\ N_0+(1+\log_2 N_ზ)N< N_{ფრ}\log_2 N_ზ, \end{cases} \quad \text{საიდანაც:} \quad N_0> N_{ფრ}/\log_2 N_ზ .$$

კერძოდ, სიკაშკაშის შემდგენის შესაბამისი ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების რაოდენობისათვის უნდა დაკმაყოფილდეს პირობა N_0>341,(3) ($N_{ფრ}$=1024 და $\log_2 N_ზ$=3), ხოლო ფერსხვაობითი შემდგენებისათვის – N_0>128 ($N_{ფრ}$=256 და $\log_2 N_ზ$=2). მე-10 ცხრილში მოყვანილია ნულოვანი

არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების რაოდენობის მონაცემები საცდელი გამოსახულებების სამივე შემდგენისათვის.

ცხრილი 10. ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების რაოდენობის მონაცემები საცდელი გამოსახულებების სამივე (Y, C_r და C_b) შემდგენისათვის

გამოსახულებები	N_0			გამოსახულებები	N_0		
	Y	C_r	C_b		Y	C_r	C_b
1	2	3	4	1	2	3	4
“ლენა”	26	56	59	“გარნიტური”	56	81	91
“ბიონსე”	129	54	46	“შროშანი”	52	22	42
“ბუნება”	30	**177**	86	“მთები”	117	**138**	**156**
“ნაგაზი”	135	**140**	127	“ტბა”	**688**	119	**138**
“თი-ბი-სი”	**399**	**239**	**226**	“მაღაზია”	15	60	77
“კატა”	6	**146**	125	“კარუსელი”	84	119	111
“ციხესიმაგრე”	**378**	**175**	100	“შემოდგომა”	0	72	44
“ბავშვები”	0	64	30	“კოშკი”	53	92	110
“ალუბლები”	45	32	40	“კოლიზეუმი”	10	93	60
“კროსი”	6	30	26	“ტექსტი”	161	**160**	**160**
“ფერმა”	6	66	49	“ფონი”	**779**	**253**	**253**
“პარკი”	240	60	79	“ღრუბელი”	**369**	**157**	**143**
“კენკრა”	1	**161**	**167**	“მამადავითი”	0	125	79
“დაისი”	97	24	70	“ფუნიკულორი”	168	**158**	94
“ზამთარი”	1	59	16	“ტელეანძა”	**426**	**168**	**151**

მოყვანილი საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის Y შემდგე-ნებიდან ზემოთ დადგენილ პირობას აკმაყოფილებენ: “თი-ბი-სი”, “ციხე-სიმაგრე”, “ტბა”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა”. ამ გამოსახუ-ლებების ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების ზონის კოდირებისთვის საკმარისია 1 ბიტი, ხოლო დანარჩენი ტრანსფორმანტების ზონების კოდირებისათვის კი საჭირო იქნება 4 ბიტი. მაგალითად, გამოსახულება “თი-ბი-სი-ს” Y შემდგენის

ზონების კოდირებისათვის მოცემულ შემთხვევაში დაიხარჯება 399+625x4=2899 ბიტი მაშინ, როდესაც ზონების ნომრების 3-ბიტიანი კოდირებისას საჭირო იქნებოდა 1024x3=3072 ბიტი, ანუ 173 ბიტით მეტი. უფრო მნიშვნელოვან მოგება მიიღება გამოსახულებისათვის “ფონი”, რომლისთვისაც მოგება შეადგენს 1313 ბიტს. ანალოგიური გამოთვლებით ფერსხვაობითი შემდგენებისთვის, კერძოდ, “თიბისის” C_r შემდგენის შესაბამისი ტრანსფორმანტების ზონების კოდირებისათვის საჭიროა 239+17x3=290 ბიტი მაშინ, როდესაც ზონების ნომრების 2-ბიტიანი კოდირებისას საჭირო იქნებოდა 512 ბიტი (მოგება შეადგენს 222 ბიტს). აღსანიშნავია, რომ მოცემულ შემთხვევაში არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების ტრანსფორმანტებში ზონების განაწილების განსხვავებული (შედარებით ოპტიმალური) ვარიანტის გამოყენებაა შესაძლებელი.

3.2. არამთავარი კოეფიციენტების სკანირებულ მიმდევრობაში ბოლო არანულოვანი კოეფიციენტის მაქსიმალური რიგითი ნომრის გათვალისწინება

ზონური კოდირების მოცემულ ეტაპზე განისაზღვრება არამთავარი კორფიციენტების სკანირებული მიმდევრობის ბოლო არანულოვანი კოეფიციენტის რიგითი ნომერი $N_ა$, რომლის კოდირება ხდება 6-თანრიგა კოდით (სულ 63 კოეფიციენტია). მე-11 ცხრილში მოყვანილია $N_ა$-ს მონაცემები ზემოაღნიშნული საცდელი გამოსახულებების სამივე შემდგენისათვის.

ცხრილი 11. ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების სკანირებული მიმდევრობის ბოლო არანულოვანი კოეფიციენტის რიგითი ნომრები ($N_ა$) საცდელი გამოსახულებების სამივე (Y, C_r და C_b) შემდგენისათვის

საცდელი გამოსახულებები	$N_ა$			საცდელი გამოსახულებები	$N_ა$		
	Y	C_r	C_b		Y	C_r	C_b
1	2	3	4	1	2	3	4
“ლენა”	53	12	13	“გარნიტური”	48	11	9
“ბიონსე”	53	11	12	“შროშანი”	60	30	7

ცხრილი 11 (გაგრძელება)

1	2	3	4	1	2	3	4
“ბუნება”	55	17	9	“მთები”	19	4	4
“ნაგაზი”	57	8	8	“ტბა”	56	35	13
“თი-ბი-სი”	53	9	5	“მაღაზია”	53	49	12
“კატა”	54	12	18	“კარუსელი”	53	36	62
“ციხესიმაგრე”	57	9	11	“შემოდგომა”	61	9	13
“ბავშვები”	57	13	14	“კოშკი”	51	9	9
“ალუბლები”	53	18	12	“კოლიზეუმი”	46	9	9
“კროსი”	58	35	28	“ტექსტი”	62	9	9
“ფერმა”	49	9	9	“ფონი”	12	2	9
“პარკი”	43	28	62	“ღრუბელი”	25	8	9
“კენკრა”	63	62	62	“მამადავითი”	27	5	8
“დაისი”	60	35	11	“ფუნიკულორი”	39	5	9
“ზამთარი”	60	8	12	“ტელეანძა”	25	7	9

სკანირებული მიმდევრობის ბოლო არანულოვანი კოეფიციენტის რიგითი ნომერი $N_{ა}$-ს განსაზღვრით დგინდება, თუ რამდენზონიანი კოდირება იქნება საჭირო მთლიანი გამოსახულების ფრანგმენტებისათვის. თუ $N_{ა}=0$, მაშინ მთლიანი გამოსახულების ეს ფრანგმენტი ნულის ტოლია. შესაბამისად, სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის $N_{ა}$–ს მიხედვით ზონის ნომერი დადგინდება შემდეგი პრინციპით: $N_{ა}=0$ – ნულოვანი ზონა; $0<N_{ა}<2$ – პირველი ზონა; $2<N_{ა}<6$ – მეორე ზონა; $5<N_{ა}<10$ – მესამე ზონა; $6<N_{ა}<15$ – მეოთხე ზონა; $14<N_{ა}<21$ – მეხუთე ზონა; $20<N_{ა}<28$ – მექვსე ზონა და $N_{ა}>27$– მეშვიდე ზონა.

მე-11 ცხრილში მოყვანილი საცდელი გამოსახულების “ლენა” სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის $N_{ა}=53$, რაც იმას ნიშნავს, რომ ამ გამოსახულების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალურად სკანირებისას მისი 53-ე არამთავარი კოეფიციენტის შემდეგი ყველა კოეფიციენტი ნულის ტოლია და ამიტომ რადგან იგი აკმაყოფილებს პირობას $N_{ა}>27$, ამიტომ მისთვის საჭირო იქნება 7

ზონიანი კოდირება და შესაბამისად ყველა ფრაგმენტისათვის საჭირო იქნება საინფორმაციო 3 ბიტის დამატება.

ქვემოთ მოყვანილ [$FY_{ლენა}$] მატრიცაზე მოცემულია ფერადი გამოსახულების “ლენა” სიკაშკაშის Y შემდგენის დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების მაქსიმალურად შესაძლო მნიშვნელობები, სადაც ზიგზაგ-ჰორიზონტალურად სკანირების შემდეგ ბოლო არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტია 1, რომლის რიგითი ნომერია 53 (ცხრილი 12).

$$[FY_{ლენა}] = \begin{bmatrix} 79 & 48 & 35 & 11 & 5 & 2 & 2 & 1 \\ 31 & 29 & 15 & 8 & 4 & 2 & 1 & 1 \\ 16 & 15 & 13 & 6 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 6 & 6 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ცხრილი 12. ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირების წესი

-	1	5	6	14	15	27	28
2	4	7	13	16	26	29	42
3	8	12	17	25	30	41	43
9	11	18	24	31	40	44	53
10	19	23	32	39	45	52	54
20	22	33	38	46	51	55	60
21	34	37	47	50	56	59	61
35	36	48	49	57	58	62	63

[$FC_{r ლენა}$] და [$FC_{b ლენა}$] მატრიცების სახით ნაჩვენებია იმავე გამოსახულების “ლენა” ფერსხვაობითი შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების მაქსიმალური მნიშვნელობებისათვის, რომლებიც 1-ის ტოლია $N_ა$=12-ს და $N_ა$=13-ს შესაბამისად.

$$[FC_{\text{rლენა}}] = \begin{bmatrix} 23 & 6 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[FC_{\text{bლენა}}] = \begin{bmatrix} 12 & 6 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 2 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.3. ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილების დამუშავება

წინა პარაგრაფებში მიღებული შედეგების საფუძველზე შესაძლებელია ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილების დამუშავება. ამისათვის საჭიროა დადგინდეს გამოსახულების სამივე შემდგენიდან, თითოეულისათვის ყველა 8x8 ზომის ფრაგმენტის შესაბამისი ტრანსფორმანტების სკანირებული მიმდევრობების $N_ა$ რაოდენობის არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი ორობითი თანრიგების რაოდენობა ($R_{მაქს.}$), აგრეთვე საჭიროა $N_ა$ რაოდენობის $R_{მაქს.}$-ის გამომსახველი 3-თანრიგა კოდების ფორმირება. აღსანიშნავია, რომ 3-თანრიგა კოდი საკმარისია (სულ 63x3=189 ბიტი), ვინაიდან რეალური გამოსახულებების 256-დონიანი ელემენტების შემთხვევაში დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი

კოეფიციენტების მაქსიმალური მნიშვნელობა არ აღემატება 94-ს (მაქსიმუმ 7-ბიტიანი კოდირება). თუმცა, აღნიშნული ინფორმაციის დაფიქსირებისათვის ჯამში 189 ბიტზე ნაკლები შეიძლება იყოს გამოყენებული, ვინაიდან, როგორც ცნობილია, გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y შემდგენის დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შედეგად ფორმირებული ტრანსფორმანტების დაკვანტული არამთავარი კოეფიციენტების ამპლიტუდური მნიშვნელობების მაქსიმალურად შესაძლო მნიშვნელობები არ აღემატება შემდეგი მატრიცის ელემენტებს [5]:

$[F_Y(u,v)]_{\text{მაქს.}}=$

127	84	94	54	42	19	19	15
77	45	47	35	25	10	11	15
67	50	39	27	20	12	9	13
62	39	30	17	13	8	8	14
57	30	22	10	8	6	8	8
32	17	12	8	8	4	6	9
19	10	8	8	8	5	5	7
13	9	7	8	5	8	7	9

ცხადია, რომ $[F_Y(u,v)]_{\text{მაქს.}}$ მატრიცის ელემენტების ორობითი კოდირებისათვის საჭირო სიმბოლოების განაწილების მატრიცას ექნება შემდეგი სახე:

$[F_Y(u,v)]_{\text{მაქს.ორ}}=$

7	7	7	6	6	5	5	4
7	6	6	6	5	4	4	4
7	6	6	5	5	4	4	4
6	6	5	5	4	4	4	4
6	5	5	4	4	3	4	4
6	5	4	4	4	3	3	4
5	4	4	4	4	3	3	3
4	4	3	4	3	4	3	4

აქედან გამომდინარე, R-ის დამდგენი ბიტების რაოდენობის განაწილების მატრიცას ექნება შემდეგი სახე:

$[D_y(u,v)]_{\text{მაქს.}}=$

3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	3	2	3	3
3	3	3	3	3	2	2	3
3	3	3	3	3	2	2	2
3	3	2	3	2	3	2	3

იმის გამო, რომ გამოსახულებების ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების დაკვანტვისათვის გამოიყენება ერთი და იგივე, მაგრამ სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის განკუთვნილი მატრიცისაგან განსხვავებული მატრიცა, ამიტომ $[F_{Crb}(u,v)]_{\text{მაქს.}}$, $[F_{Crb}(u,v)]_{\text{მაქს.ორ.}}$ და $[D_y(u,v)]_{\text{მაქს.}}$ მატრიცები წარმოდგენილნი იქნებიან შემდეგი სახით:

$[F_{Crb}(u,v)]_{\text{მაქს.}}=$

-	51	39	18	10	8	10	9
51	26	25	10	7	6	7	9
35	25	11	7	8	7	6	7
19	10	7	5	7	7	7	9
10	7	8	7	5	5	8	6
8	6	7	7	7	4	7	9
10	7	6	7	8	7	7	7
9	9	7	9	6	9	7	9

$[F_{Crb}(u,v)]_{\text{მაქს.ორ}}=$

-	6	6	5	4	4	4	4
6	5	5	4	3	3	3	4
6	5	4	3	4	3	3	3
5	4	3	3	3	3	3	4
4	3	4	3	3	3	4	3
4	3	3	3	3	2	3	4
4	3	3	3	4	3	3	3
4	4	3	4	3	4	3	4

$[D_{Crb}(u,v)]_{\text{მაქს.}}=$

-	3	3	3	3	3	3	3
3	3	3	3	2	2	2	3
3	3	3	2	3	2	2	2
3	3	2	2	2	2	2	3
3	2	3	2	2	2	3	2
3	2	2	2	2	2	2	3
3	2	2	2	3	2	2	2
3	3	2	3	2	3	2	3

მაგალითად გამოსახულებისათვის “ლენა” $N_{Y\text{ა}}=53$, $N_{Cr\text{ა}}=12$ და $N_{Cb\text{ა}}=13$. იმის დასადგენად, თუ ჯამში რამდენი ბიტია საჭირო R-ის მნიშვნელობების გასაგებად სკანირებული მიმდევრობის $N_{\text{ა}}$ რაოდენობის კოეფიციენტებიდან თითოეულისათვის, უნდა შეიკრიბოს შესაბამისი [D(u,v)] მატრიცის ელემენტების სკანირებული მიმდევრობის პირველი $N_{\text{ა}}$ წევრი, რის შედეგადაც Y შემდგენისათვის მიიღება 156 ბიტი (189 ბიტის ნაცვლად), C_r შემდგენისათვის – 36 ბიტი, ხოლო C_b-თვის – 39 ბიტი. შესაბამისად საცდელად შერჩეული გამოსახულებებისათვის საჭირო იქნება შემდეგი ბიტების რაოდენობა: “ფონი” - Y შემდგენისათვის – 36 ბიტი, C_r შემდგენისათვის – 6 ბიტი, C_b შემდგენისათვის – 27 ბიტი; “ალუბალი” – Y შემდგენისათვის – 156 ბიტი, C_r შემდგენისათვის – 51

ბიტი, C_b შემდგენისათვის – 36 ბიტი; “ზამთარი” – Y შემდგენისათვის – 173 ბიტი, C_r შემდგენისათვის – 24 ბიტი, C_b შემდგენისათვის – 36 ბიტი;

საცდელად შერჩეული სხვადასხვა დეტალობის (ძალზე მცირე – “ფონი”, მცირე – “ლენა”, საშუალო – “ალუბლები” და მაღალი – ”ზამთარი”) ფერადი გამოსახულებების შესბამისი M-ისა და $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები მოცემულია ქვემოდ მოყვანილ ცხრილებში (ცხრილი 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19).

ცხრილი 13. გამოსახულება “ფონი”-ს Y, C_r და C_b შემდგენების ტრანსფორ-მანტების კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი სვეტის ნომრის (R) მონაცემები

გამოსახულება “ფონი”						
F(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	M_{Cr}	$R_{Crმაქს.}$	M_{Cb}	$R_{Cbმაქს.}$
1	2	2	0	0	1	1
2	3	2	1	1	1	1
3	1	1	-	-	-	-
4	0	0	-	-	-	-
5	1	1	-	-	-	-
6	0	0	-	-	-	-
7	0	0	-	-	-	-
8	0	0	-	-	-	-
9	1	1	-	-	-	-
10	1	1	-	-	-	-
11	1	1	-	-	-	-
12	1	1	-	-	-	-

ცხრილი 14. გამოსახულება “ლენა”-ს Y შემდგენის შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები

გამოსახულება “ლენა”								
Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$
1	6	3	19	2	2	37	0	0
2	5	3	20	2	2	38	1	1

ცხრილი 14. (გაგრძელება)

Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$
3	5	3	21	1	1	39	1	1
4	5	3	22	2	2	40	1	1
5	6	3	23	2	2	41	1	1
6	4	3	24	3	2	42	1	1
7	4	3	25	2	2	43	1	1
8	4	3	26	2	2	44	1	1
9	3	2	27	2	2	45	1	1
10	3	2	28	1	1	46	1	1
11	3	2	29	1	1	47	0	0
12	4	3	30	1	1	48	0	0
13	4	3	31	2	2	49	0	0
14	3	2	32	1	1	50	0	0
15	2	2	33	1	1	51	0	0
16	3	2	34	1	1	52	1	1
17	3	2	35	0	0	53	1	1
18	3	2	36	0	0	54	-	-

ცხრილი 15. გამოსახულება "ლენა"-ს C_r და C_b შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები

გამოსახულება "ლენა"					
$FC_r(u,v)$	M_{Cr}	$R_{Crმაქს..}$	$FC_b(u,v)$	M_{Cb}	$R_{Cbმაქს.}$
1	3	2	1	3	2
2	4	3	2	3	2
3	2	2	3	1	1
4	2	2	4	2	2
5	2	2	5	2	2
6	1	1	6	1	1
7	2	2	7	2	2
8	1	1	8	1	1

ცხრილი 15. (გაგრძელება)

FCr(u,v)	MCr	RCrmaqs.	FCb(u,v)	MCb	RCbmaqs.
9	1	1	9	1	1
10	0	0	10	0	0
11	0	0	11	0	0
12	1	1	12	1	1
13	-	-	13	1	1

ცხრილი 16. გამოსახულება “ალუბალი”-ს Y შემდგენის შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{\text{მაქს.}}$-ის მონაცემები

გამოსახულება “ალუბალი”								
Fy(u,v)	M_y	$R_{y\text{მაქს..}}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{y\text{მაქს..}}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{y\text{მაქს.}}$
1	6	3	19	3	2	37	1	1
2	6	3	20	3	2	38	1	1
3	5	3	21	1	1	39	1	1
4	5	3	22	2	2	40	1	1
5	6	3	23	2	2	41	1	1
6	4	3	24	2	2	42	1	1
7	5	3	25	2	2	43	1	1
8	5	3	26	1	1	44	1	1
9	4	3	27	1	1	45	1	1
10	4	3	28	1	1	46	1	1
11	3	2	29	1	1	47	1	1
12	4	3	30	1	1	48	0	0
13	4	3	31	2	2	49	0	0
14	3	2	32	1	1	50	0	0
15	2	2	33	2	2	51	0	0
16	3	2	34	1	1	52	0	0
17	3	2	35	1	1	53	1	1
18	3	2	36	1	1	54	-	-

ცხრილი 17. გამოსახულება "ალუბალი"-ს C_r და C_b შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები

გამოსახულება "ალუბალი"					
$FC_r(u,v)$	M_{Cr}	$R_{Crმაქს.}$	$F_{Cb}(u,v)$	M_{Cb}	$R_{Cbმაქს.}$
1	4	3	1	3	2
2	4	3	2	3	2
3	3	2	3	3	2
4	3	2	4	3	2
5	3	2	5	3	2
6	1	1	6	1	1
7	2	2	7	2	2
8	2	2	8	2	2
9	2	2	9	1	1
10	1	1	10	0	0
11	1	1	11	1	1
12	1	1	12	1	1
13	1	1	13	-	-
14	0	0	14	-	-
15	0	0	15	-	-
16	0	0	16	-	-
17	0	0	17	-	-
18	1	1	18	-	-

ცხრილი 18. გამოსახულება "ზამთარი"-ს Y შემდგენის შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდური მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები

გამოსახულება "ზამთარი"								
$Fy(u,v)$	M_y	$R_{yმაქს.}$	$Fy(u,v)$	M_y	$R_{yმაქს.}$	$Fy(u,v)$	M_y	$R_{yმაქს.}$
1	5	3	21	1	1	41	1	1
2	6	3	22	2	2	42	1	1
3	5	3	23	2	2	43	1	1

ცხრილი 18. (გაგრძელება)

Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$	Fy(u,v)	M_y	$R_{yმაქს.}$
4	4	3	24	2	2	44	1	1
5	5	3	25	2	2	45	0	0
6	3	2	26	2	2	46	1	1
7	4	3	27	2	2	47	1	1
8	4	3	28	1	1	48	0	0
9	4	3	29	1	1	49	0	0
10	3	2	30	1	1	50	1	1
11	3	2	31	1	1	51	1	1
12	3	2	32	1	1	52	0	0
13	3	2	33	2	2	53	1	1
14	3	2	34	1	1	54	1	1
15	2	2	35	1	1	55	0	0
16	2	2	36	1	1	56	0	0
17	2	2	37	1	1	57	0	0
18	3	2	38	1	1	58	0	0
19	2	2	39	1	1	59	0	0
20	2	2	40	1	1	60	1	1

ცხრილი 19. გამოსახულება "ზამთარი"-ს C_r და C_b შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტებიდან მაქსიმალური ამპლიტუდერი მნიშვნელობის მქონე კოეფიციენტები (M) და მათი შესაბამისი $R_{მაქს.}$-ის მონაცემები

გამოსახულება "ზამთარი"					
$FC_r(u,v)$	M_{Cr}	$R_{Crმაქს.}$	$FC_b(u,v)$	M_{Cb}	$R_{Cbმაქს.}$
1	2	2	1	3	2
2	2	2	2	3	2
3	1	1	3	2	2
4	1	1	4	2	2
5	1	1	5	2	2
6	0	0	6	1	1
7	1	1	7	1	1

ცხრილი 19. (გაგრძელება)

$FC_r(u,v)$	M_{Cr}	$R_{Cr\text{მაქს.}}$.	$FC_b(u,v)$	M_{Cb}	$R_{Cb\text{მაქს.}}$
8	1	1	8	2	2
9	-	-	9	1	1
10	-	-	10	0	0
11	-	-	11	0	0
12	-	-	12	1	1

სკანირებულ მიმდევრობაში კოეფიციენტების შესაბამისი $R_{\text{მაქს.}}$-ის მნიშვნელობების დაფიქსირების შედეგად ზონაში შემავალი ნულოვანი და არანულოვანი კოეფიციენტების შესახებ ინფორმაციის დაფიქსირებისას გამოტოვებული იქნება ის კოეფიციენტები, რომელთა შესაბამისი $R_{\text{მაქს.}}=0$.

კოდირების შემდეგ საფეხურზე ფიქსირდება თითოეული ტრანსფორმანტის ზონაში (მინიზონის გათვალისწინებით) შემავალი ნულის არატოლი (არანულოვანი) და ნულის ტოლი (ნულოვანი) კოეფიციენტების რაოდენობა, მოცემული გამოსახულებისათვის დადგენილი $R_{\text{მაქს.}}$-ის განაწილების მხედველობაში მიღებით, რაც იმას ნიშნავს, რომ აღნიშნული კოეფიციენტების რაოდენობას გამოაკლდება იმ კოეფიციენტების რაოდენობა, რომელთა შესაბამისი $R_{\text{მაქს.}}=0$. შესაბამისად შემდგომი დამუშავებისათვის დარჩენილ ყოველ კოეფიციენტს შეესაბამება ერთი ბიტი, რომლითაც ირკვევა, ესა თუ ის კოეფიციენტი არანულოვანია თუ ნულოვანი. კოდირების შემდეგ ეტაპებზე გამოირიცხება ნულოვანი კოეფიციენტები, ხოლო არანულოვანი კოეფიციენტების კოდირება მოხდება არამთავარი კოეფიციენტებისათვის განკუთვნილი ჰაფმანის ცხრილების იმ ნაწილის მოდიფიცირებული ვარიანტების გამოყენებით, რომლისთვისაც ნულოვანი კოეფიციენტების რაოდენობა ნულის ტოლია.

ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილების ფორმირებისას მხედველობაშია მიღებული ის გარემოება, რომ რეალური გამოსახულებებისათვის არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების მაქსიმალურად შესაძლო მნიშვნელობების კოდირებისათვის საკმარისია

7 ბიტი, ხოლო მინიმალურისათვის – 1 ბიტი, რომელიც გამოსახავს მნიშვნელობით 1-ის ტოლი კოეფიციენტის ნიშანს.

ცხრილი 20. ჰაფმანის მოდიფიცირებული კოდები და ტრანსფორმანტების არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობები r-ის სხვადასხვა რეალური მნიშვნელობისათვის

R		1	2	3	4	5	6	7
ჰაფმანის მოდიფიცირებული კოდები	r=7	0	10	110	1110	11110	111110	111111
	r=6	0	10	110	1110	11110	11111	-
	r=5	0	10	110	1110	1111	-	-
	r=4	0	10	110	111	-	-	-
	r=3	0	10	11	-	-	-	-
	r=2	0	1	-	-	-	-	-
	r=1	-	-	-	-	-	-	-
R		1	2	3	4	5	6	7
ბიტების რაოდენობები ჰაფმანის მოდიფიცირებული კოდებისათვის, M	r=7	1	2	3	4	5	6	6
	r=6	1	2	3	4	5	5	-
	r=5	1	2	3	4	4	-	-
	r=4	1	2	3	3	-	-	-
	r=3	1	2	2	-	-	-	-
	r=2	1	1	-	-	-	-	-
	r=1	0	-	-	-	-	-	-
R+M	r=7	2	4	6	8	10	12	13
	r=6	2	4	6	8	10	11	-
	r=5	2	4	6	8	9	-	-
	r=4	2	4	6	7	-	-	-
	r=3	2	4	5	-	-	-	-
	r=2	2	3	-	-	-	-	-
	r=1	1	-	-	-	-	-	-

ტრანსფორმანტას იმ არანულოვანი კოეფიციენტებისათვის, რომლებიც მოცემული კონკრეტული გამოსახულებისათვის იმყოფებიან $R_{მაქს.}$=7-ის არეში (თუ ასეთი შემთხვევა ფიქსირდება მოცემულ გამოსა-

ხულებაში), გამოყენებული იქნება 20-ე ცხრილის ის ნაწილი, რომლისთვისაც r=7, იმ არანულოვანი კოეფიციენტებისათვის, რომლებიც იმყოფებიან $R_{\text{მაქს.}}$=6-ის არეში (თუ ასეთი შემთხვევა ფიქსირდება მოცემულ გამოსახულებაში) – 20-ე ცხრილის ის ნაწილი, რომლისთვისაც r=6 და ასე შემდეგ იმ არანულოვანი კოეფიციენტებისათვის, რომლებიც მოცემული კონკრეტული გამოსახულებისათვის იმყოფებიან $R_{\text{მაქს.}}$=1-ის არეში (თუ ასეთი შემთხვევა ფიქსირდება მოცემულ გამოსახულებაში), მაშინ – ცხრილის ის ნაწილი, რომლისთვისაც r=1. აღსანიშნავია, რომ იმ შემთხვევაში, როდესაც r=1, კოდირება ხდება ამპლიტუდით 1-ის ტოლი არანულოვანი კოეფიციენტისა, ამიტომ ამ დროს საკამარისია მხოლოდ 1 ბიტი (0 ან 1) კოეფიციენტის ნიშნის დაფიქსირებისათვის (R=1). კავშირი R-სა და ტრანსფორმანტების არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების მნიშვნელობებს შორის ნაჩვენებია 21-ე ცხრილში.

მაგალითად, გამოსახულების "ლენა" სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის (შესაბამისი $R_{\text{მაქს.}}$-ის განაწილება არამთავარი კოეფიციენტების სკანირებულ მიმდევრობაში მოყვანილია მე-14 ცხრილში) ტრანსფორმანტების იმ კოეფიციენტების კოდირებისათვის, რომელთა ნომერი ემთხვევა $R_{\text{მაქს.}}$=3-ის ნომერს, გამოყენებული იქნება მე-20 ცხრილის ის ნაწილი, რომლისთვისაც r=3, ხოლო იმ კოეფიციენტებისათვის, რომელთა ნომერი ემთხვევა $R_{\text{მაქს.}}$=2-ის ნომერს, – ცხრილის ის ნაწილი, რომლისთვისაც r=2 და ასე შემდეგ.

ცხრილი 21. კავშირი R-სა და ტრანსფორმანტების არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების მნიშვნელობებს შორის

R	არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების მნიშვნელობები											
1	-1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-3	-2	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-7	-6	-5	-4	4	5	6	7	-	-	-	-
4	-15	-14	-13	…	-9	-8	8	9	10	…	13	14	15
5	-31	-30	-29	-28	…	-17	-16	16	17	…	29	30	31
6	-63	-62	-61	-60	…	-33	-32	32	33	…	61	62	63
7	-127	-126	-125	-124	…	-65	-64	64	65	…	125	126	127

3.4. ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კომპაქტური კოდირება სკანირების საუკეთესო ვარიანტის შერჩევით

გამოსახულებათა არსებული მეთოდის მიხედვით ტრანსფორმან-ტების არამთავარი კოეფიციენტების კოდირებისას ხდება ტრანსფორმან-ტების ელემენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირება. (იხ. § 2.2).

გარდასახვის არამთავარი ელემენტების ორგანზომილებიანი მასი-ვის ელემენტებისათვის ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირების გარდა შესაძლებელია გამოყენებული იყოს ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირება.

ნახ. 8 და 9-ზე ნაჩვენებია გარდასახვის ორგანზომილებიანი მასივის ელემენტებისათვის ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებების ნიმუშები, ხოლო 22-ე ცხრილში მო-ცემულია საცდელი გამოსახულებების სამივე Y, C_r და C_b შემდგენე-ბისათვის სკანირების ორივე მეთოდისთვის საჭირო ბიტების რაოდენო-ბა, ტრანსფორმანტების არსებული და ზონური მეთოდებით კოდირებისას.

-	F(0,1)	F(0,2)	F(0,3)	F(0,4)	F(0,5)	F(0,6)	F(0,7)
F(1,0)	F(1,1)	F(1,2)	F(1,3)	F(1,4)	F(1,5)	F(1,6)	F(1,7)
F(2,0)	F(2,1)	F(2,2)	F(2,3)	F(2,4)	F(2,5)	F(2,6)	F(2,7)
F(3,0)	F(3,1)	F(3,2)	F(3,3)	F(3,4)	F(3,5)	F(3,6)	F(3,7)
F(4,0)	F(4,1)	F(4,2)	F(4,3)	F(4,4)	F(4,5)	F(4,6)	F(4,7)
F(5,0)	F(5,1)	F(5,2)	F(5,3)	F(5,4)	F(5,5)	F(5,6)	F(5,7)
F(6,0)	F(6,1)	F(6,2)	F(6,3)	F(6,4)	F(6,5)	F(6,6)	F(6,7)
F(7,0)	F(7,1)	F(7,2)	F(7,3)	F(7,4)	F(7,5)	F(7,6)	F(7,7)

ნახ. 8. ტრანსფორმანტების არამთავარი ელემენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირება

ნახ. 8-დან ჩანს, რომ ზიგზაგ-ვერტიკალურად სკანირების შედეგად არამთავარი კოეფიციენტების ორგანზომილებიანი მასივი წარმოდგება შემდეგი ერთგანზომილებიანი მიმდევრობის სახით: F(0,1), F(1,0), F(2,0), F(1,1), F(0,2), F(0,3), F(1,2), F(2,1), F(3,0), F(4,0), F(3,1), F(2,2), F(1,3), F(0,4), F(0,5), F(1,4), F(2,3), F(3,2), F(4,1), F(5,0), F(6,0), F(5,1), F(4,2), F(3,3), F(2,4), F(1,5), F(0,6), F(0,7), F(1,6), F(2,5), F(3,4), F(4,3), F(5,2), F(6,1), F(7,0), F(7,1), F(6,2), F(5,3), F(4,4), F(3,5), F(2,6), F(1,7), F(2,7), F(3,6), F(4,5), F(5,4), F(6,3), F(7,2), F(7,3), F(6,4), F(5,5), F(4,6), F(3,7), F(4,7), F(5,6), F(6,5), F(7,4), F(7,5), F(6,6), F(5,7), F(6,7), F(7,6), F(7,7).

	F(0,1)	F(0,2)	F(0,3)	F(0,4)	F(0,5)	F(0,6)	F(0,7)
F(1,0)	F(1,1)	F(1,2)	F(1,3)	F(1,4)	F(1,5)	F(1,6)	F(1,7)
F(2,0)	F(2,1)	F(2,2)	F(2,3)	F(2,4)	F(2,5)	F(2,6)	F(2,7)
F(3,0)	F(3,1)	F(3,2)	F(3,3)	F(3,4)	F(3,5)	F(3,6)	F(3,7)
F(4,0)	F(4,1)	F(4,2)	F(4,3)	F(4,4)	F(4,5)	F(4,6)	F(4,7)
F(5,0)	F(5,1)	F(5,2)	F(5,3)	F(5,4)	F(5,5)	F(5,6)	F(5,7)
F(6,0)	F(6,1)	F(6,2)	F(6,3)	F(6,4)	F(6,5)	F(6,6)	F(6,7)
F(7,0)	F(7,1)	F(7,2)	F(7,3)	F(7,4)	F(7,5)	F(7,6)	F(7,7)

ნახ. 9. ტრანსფორმანტების არამთავარი ელემენტების ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირება

ნახ. 9-დან ჩანს, რომ ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირების შედეგად არამთავარი კოეფიციენტების ორგანზომილებიანი მასივს აქვს შემდეგი ერთგანზომილებიანი მიმდევრობის სახე: F(1,0), F(0,1), F(0,2), F(1,1), F(2,0), F(3,0), F(2,1), F(1,2), F(0,3), F(0,4), F(1,3), F(2,2), F(3,1), F(4,0), F(5,0), F(4,1), F(3,2), F(2,3), F(1,4), F(0,5), F(0,6), F(1,5), F(2,4), F(3,3), F(4,2), F(5,1), F(6,0), F(7,0), F(6,1), F(5,2), F(4,3), F(3,4), F(2,5), F(1,6), F(0,7), F(1,7), F(2,6), F(3,5), F(4,4), F(5,3), F(6,2), F(7,1), F(7,2), F(6,3), F(5,4), F(4,5), F(3,6), F(2,7), F(3,7), F(4,6), F(5,5), F(6,4), F(7,3), F(7,4), F(6,5), F(5,6), F(4,7), F(5,7), F(6,6), F(7,5), F(7,6), F(6,7), F(7,7).

22-ე ცხრილში მოცემული შედეგების მიხედვით გამომდინარეობს, რომ ზოგიერთი საცდელი გამოსახულებების სხვადასხვა შემდგენისათვის ზიგზაგ-ვერტიკალურ სკანირებას აქვს უფრო კარგი შედეგი, ვიდრე მათი ელემენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალურ სკანირებას.

ცხრილი 22. საცდელი გამოსახულებების სამივე Y, C_r და C_b შემდგენებისათვის ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა, არსებული და ზონური მეთოდებით ტრანსფორმანტების კოდირებისას

გამოსახულებები	ჰორიზონტალური		ვერტიკალური		ჰორიზონტალური		ვერტიკალური		ჰორიზონტალური		ვერტიკალური	
	$Y_{\text{ა}}$	$Y_{\text{ზ}}$	$Y_{\text{ა}}$	$Y_{\text{ზ}}$	$C_{r\text{ა}}$	$C_{r\text{ზ}}$	$C_{r\text{ა}}$	$C_{r\text{ზ}}$	$C_{b\text{ა}}$	$C_{b\text{ზ}}$	$C_{b\text{ა}}$	$C_{b\text{ზ}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
“ლენა”	55771	57654	**55586**	57668	4108	4167	**4105**	4232	**4323**	4439	4346	4495
“ბიონსე”	**52668**	54680	52693	54755	4046	4111	**4018**	4110	4597	4743	**4596**	4732
“ბუნება”	69692	72746	**69179**	72760	2756	2749	**2712**	2753	3160	**3078**	3097	3084
“ნაგაზი”	52845	54257	**52736**	54195	2215	2110	2261	**2088**	2598	2534	2632	**2504**
“თი-ბი-სი”	44978	45460	**44831**	45600	1220	**758**	1207	**758**	1321	**878**	1312	**878**
“კატა”	61743	64280	**61717**	64313	3030	2863	2975	**2832**	3692	3975	**3631**	3792
“ციხესიმაგრე”	62916	64843	**62724**	64804	1891	**1633**	1883	1644	3534	3587	**3523**	3598
“ბავშვები”	82773	86367	**82554**	86500	4131	4193	**4092**	4231	5711	6015	**5692**	6020
“ალუბლები”	64684	67513	**64581**	67562	**7524**	8338	7569	8399	5174	5352	**5154**	5344
“კროსი”	94288	98272	**93816**	98211	**5921**	7097	5924	7533	6142	7470	**6131**	7743
“ფერმა”	76646	79971	**76408**	79972	3423	3398	**3375**	3386	3961	3975	**3945**	3960
“პარკი”	**62080**	64718	62519	65116	**5440**	6563	5503	7748	**8874**	14029	9117	14281
“კენკრა”	**104691**	**112228**	**104623**	**112221**	**4700**	**5989**	**4689**	**5934**	**3221**	**4097**	**3192**	**4080**
“დაისი”	29594	29535	**29287**	29428	5503	7102	**5391**	6219	3375	3285	**3265**	3319

ცხრილი 22. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
“ზამთარი”	66563	68390	**66399**	68251	3017	2995	**2970**	2976	4286	4457	**4267**	4498
“გარნიტური”	44381	44932	**43532**	44751	3582	3584	**3520**	3533	3099	**3009**	3049	2994
“შროშანი”	80953	86196	**80725**	86089	**5460**	6687	5473	7418	**9310**	14808	9371	13610
“მთები”	16811	16294	**16280**	16287	1655	**1287**	1450	1297	1627	**1232**	1451	1240
“ტბა”	35982	35804	**35651**	35731	3219	3730	**3156**	3572	3108	**2927**	3040	2937
“მაღაზია”	68379	70272	**67603**	70055	5052	6979	**5038**	6481	3387	3477	**3380**	3449
“კარუსელი”	49322	51258	**49122**	51176	4889	6992	**4880**	7196	**7952**	12496	8007	12440
“შემოდგომა”	**103086**	110153	103270	110329	3118	3056	**3041**	3049	3998	4074	**3899**	4076
“კოშკი”	77958	81586	**77760**	81648	2651	**2593**	2617	2617	2779	2685	2718	**2677**
“კოლიზეუმი”	79561	82904	**79522**	83044	3360	**3333**	3431	3336	**4039**	4062	4106	4064
“ტექსტი”	39484	**38877**	38991	39131	1966	**1771**	1928	1780	1959	**1764**	1931	1784
“ფონი”	8307	4910	8078	**4906**	1164	**658**	1158	**658**	1180	**676**	1178	**676**
“ღრუბელი”	22520	**21949**	22547	22048	2076	1866	2047	**1865**	2305	2138	2262	**2133**
“მამადავითი”	43326	43761	**43242**	43835	2047	**1805**	2043	1809	2649	2613	**2560**	2614
“ფუნიკულორი”	39769	40469	**39686**	40526	1758	**1442**	1725	1443	2681	**2571**	2647	2593
“ტელეანძა”	23863	23102	23514	**22925**	1988	1730	1942	**1715**	2472	2280	2423	**2263**

3.5. ტრანსფორმანტების სტატისტიკისა და სკანირების ვარიანტების გათვალისწინებით ზონური კოდირების ეფექტურობის განსაზღვრა

როგორც ნაშრომის მოცემული თავის წინა პარაგრაფებიდან გამომდინარეობს, კოდირების აღწერილი მეთოდის შემთხვევაში გამოსახულების თითოეული შემდგენისათვის უნდა დაფიქსირდეს კოდური ჯგუფები შემდეგი სახის ინფორმაციებით:

1. ტრანსფორმანტების $N_{მთ.}$ რაოდენობის მთავარი F(0,0) კოეფიციენტების სხვაობითი მნიშვნელობების არსებული ცხრილებით კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა $M_{Nმთ.}$

2. ტრანსფორმანტაში ზონების ($N_{ზ}$) კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა $M_{Nზ}$ (ბიტი);

3. მინიზონების ($N_{მზ}$) კოდირებისთვის საჭირო ბიტების რაოდენობა $M_{Nმზ}$ (ბიტი);

4. მოცემული გამოსახულების შესაბამისი ყველა ტრანსფორმან-ტას კოეფიციენტების სკანირებული მიმდევრობებიდან არანულოვანი კოეფიციენტის (კოეფიციენტების) მაქსიმალური ნომერი (კოორდინატი)– $N_{ა}$ და მისი შესაბამისი ექვსთანრიგა ორობითი რიცხვი – $M_{Nა}=6$ ბიტი;

5. მოცემული გამოსახულების შესაბამისი $N_{ა}$ რაოდენობის კოეფიციენტებიდან თითოეულის კოდირებისთვის საჭირო ბიტების რაოდენობა დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის რანსფორმანტებში კოეფიციენტების მაქსიმალურად შესაძლო ამპლიტუდური მნიშვნელობის არსებობის გათვალისწინებით და აღნიშნულის შესაბამისად ყველა ტრანსფორმანტაში ერთნაირი კოორდინატის მქონე ნულოვანი კოეფიციენტების შესაძლო არსებობისა და რაოდენობის დადგენა – $M_{1Nა}$ (ბიტი).

6. მე-4 პუნქტის მონაცემების გათვალისწინებით ყოველი ტრანსფორმანტას დაფიქსირებულ ზონაში შემავალი $N_{ან}$ რაოდენობის არანულოვანი და ნულოვანი კოეფიციენტებისა და შესაბამისი ბიტების რაოდენობის დადგენა – $M_{Nან}$ (ბიტი) (თითო დასაფიქსირებელი კოეფიციენტისათვის თითო ბიტი).

7. მე-6 პუნქტის მონაცემების გათვალისწინებით ტრანსფორმანტას დაფიქსირებულ ზონაში შემავალი არანულოვანი კოეფიციენტების ჰაფმანის მოდიფიცირებული კოდებით კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობის დადგენა $M_{\text{Nარ}}$ (ბიტი).

ამრიგად, ზემოთ აღწერილი მეთოდის საფუძველზე ფერადი გამოსახულებების თითოეული (Y, C_r და C_b) შემდგენის დაკვანტული ტრანსფორმანტების ზონური კოდირებისათვის დახარჯული ორობითი სიმბოლოების ჯამური რაოდენობა ტოლი იქნება:

$$M_{\text{ზ}} = M_{\text{მთ.}} + M_{\text{Nზ}} + M_{\text{Nმზ}} + M_{\text{Nა}} + M_{\text{1Nა}} + M_{\text{Nან}} + M_{\text{Nარ}}.$$

23-ე, 24-ე, 25-ე და 26-ე ცხრილებში წარმოდგენილია დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის საფუძველზე საცდელ გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების და მთლიანად გამოსახულების შესაბამისი დაკვანტული ტრანსფორმანტების უდანაკარგო კოდირების შედეგები როგორც არსებული, ასევე ზონური კოდირებისას, კერძოდ: კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობები $M_{\text{ა}}$ და $M_{\text{ზ}}$, კომპრესიის ფაქტორები $F_{\text{ა}}$ და $F_{\text{ზ}}$ და არსებული კოდირებისას მოგებული ბიტების რაოდენობები (ΔM) არსებულ კოდირებასთან შედარებით. აღსანიშნავია, რომ კომპრესიის ფაქტორი F განისაზღვრება როგორც საწყისი გამოსახულებისათვის გამოყენებული ბიტების რაოდენობა შეფარდებული ეფექტური კოდირების (კომპრესიის) შედეგად დახარჯული ბიტების რაოდენობასთან.

ცხრილი 23. საცდელ გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y შემდგენის კოდირების შედეგები არსებული და სტატისტიკის გათვალისწინებით ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენებით

გამოსახულებები	$M_{\text{ა}}$,	$F_{\text{ა}}$	$M_{\text{ზ}}$,	$F_{\text{ზ}}$	ΔM,
1	2	3	4	5	6
“ლენა”	55771	9.401	57042	9.823	-1271
“ბიონსე”	52668	9.955	54300	10.096	-1632
ბუნება”	69692	7.523	72227	7.641	-2535
“ნაგაზი”	52845	9.921	53877	10.230	-1032
“თი-ბი-სი”	44978	11.657	45161	11.968	-183
“კატა”	61743	8.491	63917	8.512	-2174

ცხრილი 23. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
“ციხესიმაგრე”	62916	8.333	63808	8.552	-892
“ზავშვები’	82773	6.334	85545	6.395	-2772
“ალუბლები”	64684	8.105	67157	8.188	-2473
“კროსი”	94288	5.560	97045	5.671	-2757
“ფერმა”	76646	6.840	79296	6.915	-2650
“პარკი”	62080	8.445	64216	8.697	-2136
“კენკრა”	104691	5.008	110979	5.043	-6288
“დაისი”	29594	17.716	**29467**	**18.149**	**127**
“ზამთარი”	66563	7.877	67255	7.943	-692
“გარნიტური”	44381	11.813	44745	12.135	-364
“შროშანი”	80953	6.476	85040	6.547	-4087
“მთები”	16811	31.187	**15477**	**33.897**	**1334**
“ტბა”	35982	14.571	**35465**	**15.010**	**517**
“მაღაზია”	68379	7.667	69803	7.801	-1424
“კარუსელი”	49322	10.630	50851	10.718	-1529
“შემოდგომა”	103086	5.086	108783	5.117	-5697
“კოშკი”	77958	6.725	81056	6.759	-3098
“კოლიზეუმი”	79561	6.590	82485	6.643	-2924
“ტექსტი”	39484	13.278	**39038**	**13.620**	**446**
“ფონი”	8307	63.114	**4805**	**109.113**	**3502**
“ღრუბელი”	22520	23.281	**21729**	**24.311**	**791**
“მამადავითი”	43326	12.101	43675	12.269	-349
“ფუნიკულორი”	39769	13.183	40165	13.294	-396
“ტელეანძა”	23863	17.716	**22877**	**23.268**	**986**

23-ე ცხრილში წარმოდგენილი შედეგების საფუძველზე შეიძლება აღინიშნოს, რომ გამოსახულების “დაისი”, “მთები”, “ტბა”, “ტექსტი”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა” სიკაშკაშის Y შემდგენის ზონური კოდირებისას ზემოთ განხილული ალგორითმის საფუძველზე მიიღწევა უკეთესი (კომპრესიის თვალსაზრისით) შედეგები უდანაკარგო

კოდირების არსებულ ალგორითმთან შედარებით. კერძოდ, გამოსახულებისათვის “დაისი” მოგებაა – 127 ბიტი (0.43%), “მთები” – 1334 ბიტი (7.94%), “ტბა” – 517 ბიტი (1.44%), “ტექსტი” – 446 ბიტი (1.13%), “ფონი” – 3502 ბიტი (42.16%), “ღრუბელი” – 791 ბიტი (3.51%) და “ტელეანძა” – 986 ბიტი (4.13%)

ცხრილი 24. საცდელ გამოსახულებათა ფერსხვაობით C_r შემდგენის კოდირების შედეგები არსებული და სტატისტიკის გათვალისწინებით ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენებით

გამოსახულებები	$M_ა$,	$F_ა$	$M_ზ$,	$F_ზ$	ΔM,
1	2	3	4	5	6
“ლენა”	4108	31.907	**4082**	**32.110**	**26**
“ბიონსე”	4046	32.395	4069	32.212	-23
ბუნება”	2756	47.559	**2654**	**49.387**	**102**
“ნაგაზი”	2215	59.175	**2009**	**65.242**	**206**
“თი-ბი-სი”	1220	107.436	**774**	**169.344**	**446**
“კატა”	3030	43.258	**2826**	**46.381**	**204**
“ციხესიმაგრე”	1891	69.314	**1606**	**81.614**	**285**
“ბავშვები’	4131	31.729	**4135**	**31.698**	**-4**
“ალუბლები”	7524	17.421	**7779**	**16.849**	**-255**
“კროსი”	5921	22.137	**5890**	**22.253**	**31**
“ფერმა”	3423	38.292	**3338**	**39.267**	**85**
“პარკი”	5440	24.094	**5666**	**23.133**	**-226**
“კენკრა”	4700	27.888	**4659**	**28.133**	**41**
“დაისი”	5503	23.818	**5770**	**22.716**	**-267**
“ზამთარი”	3017	43.444	**2782**	**47.114**	**235**
“გარნიტური”	3582	36.592	**3490**	**37.556**	**92**
“ზამთარი”	3017	43.444	**2782**	**47.114**	**235**
“გარნიტური”	3582	36.592	**3490**	**37.556**	**92**
“შროშანი”	5460	24.006	5763	22.744	-303
“მთები”	1655	79.198	**1284**	**102.081**	**371**
“ტბა”	3219	40.718	**3084**	**42.501**	**135**
“მაღაზია”	5052	25.945	6275	20.888	-1223

ცხრილი 24. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
“კარუსელი”	4889	26.810	5603	23.393	-714
“შემოდგომა”	3118	42.037	**2983**	**43.940**	**135**
“კოშკი”	2651	49.442	**2512**	**52.178**	**139**
“კოლიზეუმი”	3360	39.010	**3312**	**39.575**	**48**
“ტექსტი”	1966	66.669	**1679**	**78.066**	**287**
“ფონი”	1164	112.605	**658**	**199.198**	**506**
“ღრუბელი”	2076	63.137	**1824**	**71.860**	**252**
“მამადავითი”	2047	64.031	**1785**	**73.430**	**262**
“ფუნიკულორი”	1758	74.557	**1428**	**91.787**	**330**
“ტელეანძა”	1988	65.932	**1717**	**76.338**	**271**

ცხრილი 25. საცდელ გამოსახულებათა ფერსხვაობით $C_{ხ}$ შემდგენის კოდირების შედეგები არსებული და სტატისტიკის გათვალისწინებით ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენებით

გამოსახულებები	$M_{ა}$,	$F_{ა}$	$M_{ზ}$,	$F_{ზ}$	ΔM,
1	2	3	4	5	6
“ლენა”	4323	30.320	**4310**	**30.411**	**13**
“ბიონსე”	4597	28.513	4646	28.212	-49
ბუნება”	3160	41.478	**3036**	**43.173**	**124**
“ნაგაზი”	2598	50.451	**2517**	**52.075**	**81**
“თი-ბი-სი”	1321	99.222	**868**	**151.005**	**453**
“კატა”	3692	35.502	3795	34.538	-103
“ციხესიმაგრე”	3534	37.089	**3490**	**37.556**	**44**
“ბავშვები’	5711	22.951	**5932**	**22.096**	**-221**
“ალუბლები”	5174	25.333	5215	25.134	-41
“კროსი”	6142	21.340	6170	21.243	-28
“ფერმა”	3961	33.091	**3908**	**33.539**	**53**
“პარკი”	8874	14.770	11409	11.488	-2535
“კენკრა”	3221	40.693	**2960**	**44.281**	**261**
“დაისი”	3375	38.836	**3257**	**40.243**	**118**

ცხრილი 25. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
“ზამთარი”	4286	30.581	4336	30.229	-50
“გარნიტური”	3099	42.295	**2903**	**45.151**	**196**
“შროშანი”	9310	14.079	11282	11.618	-1972
“მთები”	1627	80.561	**1223**	**107.173**	**404**
“ტბა”	3108	42.172	**2927**	**44.780**	**181**
“მაღაზია”	3387	38.699	**3379**	**38.790**	**8**
“კარუსელი”	7952	16.483	10854	12.076	-2902
“შემოდგომა”	3998	32.784	**3982**	**32.916**	**16**
“კოშკი”	2779	47.165	**2599**	**50.432**	**180**
“კოლიზეუმი”	4039	32.452	**4023**	**32.581**	**16**
“ტექსტი”	1959	66.908	**1681**	**77.973**	**278**
“ფონი”	1180	111.078	**679**	**193.037**	**501**
“ღრუბელი”	2305	56.864	**2072**	**63.259**	**233**
“მამადავითი”	2649	49.480	**2529**	**51.828**	**120**
“ფუნიკულორი”	2681	48.889	**2520**	**52.013**	**161**
“ტელეანძა”	2472	53.023	**2265**	**57.868**	**207**

როგორც 24-ე და 25-ე ცხრილებიდან გამომდინარეობს, ზონური კოდირება ეფექტური აღმოჩნდა უფრო მეტი რაოდენობის საცდელი გამოსახულებების ფერსხვაობითი C_r (“ლენა” (0,63%), “ბუნება” (3,70%), “ნაგაზი” (9,30%), “თიბისი” (36,56%), “კატა” (6,73%), “ციხესიმაგრე” (15,07%), “კროსი” (0,52%), “ფერმა” (2,48%), “კენკრა” (0,88%), “ზამთარი” (7,79%), “გარნიტური” (2,57%), “მთები” (22,42%), “ტბა” (4,19%), “შემოდგომა” (4,33%), “კოშკი” (5,24%), “კოლოიზეუმი” (1,43%), “ტექსტი” (14,60%), “ფონი” (43,47%), “ღრუბელი” (12,14%), “მამადავითი” (12,80%), “ფუნიკულიორი” (18,78%) და “ტელეანძა” (13,63%)) და C_b (“ლენა”(0,3%), “ბუნება” (3,92%), “ნაგაზი” (3,12%), “თიბისი” (34,29%), “ციხესიმაგრე” (1,25%), “ფერმა” (1,34%), “კენკრა” (8,10%), “დაისი” (3,5%), “გარნიტური” (6,32%), “მთები” (24,83%), “ტბა” (5,82%), “მაღაზია” (0,24%), “შემოდგომა” (0,40%), “კოშკი” (6,48%), “კოლიზეუმი” (0,40%), “ტექსტი” (14,19%),

“ფონი” (42,46%), “ღრუბელი” (10,11%), “მამადავითი” (4,53%), “ფუნიკულიორი” (6,01%) და “ტელეანძა” (8,37%)) შემდგენებისათვის.

ცხრილი 26 საცდელ გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითო C_r და C_b შემდგენების კოდირების შედეგები არსებული და სტატისტიკის გათვალისწინებით ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენებით

გამოსახულებები	$M_ა$,	$F_ა$	$M_ზ$,	$F_ზ$	ΔM,
1	2	3	4	5	6
“ლენა”	64202	24.499	65434	24.037	-1232
“ბიონსე”	61311	25.654	63015	24.960	-1704
ბუნება”	75608	20.803	77917	20.186	-2309
“ნაგაზი”	57658	27.279	58403	26.931	-745
“თი-ბი-სი”	47519	33.100	**46803**	**33.606**	**716**
“კატა”	68465	22.973	70538	22.298	-2073
“ციხესიმაგრე”	68341	23.015	68904	22.827	-563
“ბავშვები’	92615	16.983	95612	16.450	-2997
“ალუბლები”	77382	20.326	80151	19.624	-2769
“კროსი”	106351	14.789	109105	14.416	-2754
“ფერმა”	84030	18.718	86542	18.175	-2512
“პარკი”	76394	20.589	81291	19.349	-4897
“კენკრა”	112612	13.967	118598	13.262	-5986
“დაისი”	38472	40.883	38494	40.860	-22
“ზამთარი”	73866	21.293	74373	21.148	-507
“გარნიტური”	51062	30.803	51138	30.757	-76
“შროშანი”	95723	16.431	102085	15.407	-6362
“მთები”	20093	78.279	**17984**	**87.459**	**2109**
“ტბა”	42309	37.176	**41476**	**37.922**	**833**
“მაღაზია”	76818	20.475	79457	19.795	-2639
“კარუსელი”	62163	25.302	67308	23.368	-5145
“შემოდგომა”	110202	14.273	115748	13.589	-5546
“კოშკი”	83388	18.862	86167	18.254	-2779
“კოლიზეუმი”	86960	18.087	89820	17.511	-2860

ცხრილი 26. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6
"ტექსტი"	43409	36.234	**42398**	**37.098**	**1011**
"ფონი"	10651	147.673	**6142**	**256.083**	**4509**
"ღრუბელი"	26901	58.469	**25625**	**61.380**	**1276**
"მამადავითი"	48022	32.753	**47989**	**32.776**	**33**
"ფუნიკულორი"	44208	35.579	**44113**	**35.655**	**95**
"ტელეანძა"	28323	55.533	**26859**	**58.560**	**1464**

ზოგიერთ გამოსახულებათა სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების შემოთავაზებული მეთოდით კოდირებისას, სხვადასხვა შემდგენებში აღმოჩნდა უფრო უკეთესი შედეგი, ვიდრე არსებული მეთოდით კოდირებისას (ცხრილი 26). მიუხედავად ამისა, სრული სიგნალისათვის დადებითი შედეგი აღმოჩნდა მხოლოდ რამდენიმე გამოსახულებაში: "თი-ბი-სი" – 716 ბიტი (1,51%), "მთები" – 2109 ბიტი (10.50%), "ტბა" – 833 ბიტი (1,97%), "ტექსტი" – 1011 ბიტი (2,33%), "ფონი" – 4509 ბიტი (42,33%), "ღრუბელი" – 1276 ბიტი (4,74%), "მამადავითი" – 33 ბიტი (0,07%), "ფუნიკულიორი" – 95 ბიტი (0,21%), "ტელეანძა" – 1464 ბიტი (5,17%),

ცნობილია, რომ დაკვანტული ტრანსფორმანტების უდანაკარგო კომპრესია შეიძლება განხორციელდეს არითმეტიკული კოდირების გამოყენებითაც, რომელიც, მისი რეალიზაციის განსაკუთრებული სირთულის მიუხედავად, ტიპიური უწყვეტ-ტონური (მნიშვნელობათა მდორედ ცვლადი) გამოსახულებებისათვის კომპრესიის მაჩვენებლებს აუმჯობესებს მხოლოდ 5-10%-ით ჰაფმანის კოდების გამოყენებასთან შედარებით [14].

როგორც გამოსახულებათა ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენების შედეგებიდან ჩანს მრავალი გამოსახულების კოდირებისას შეიძლება მიღწეული იყოს კომპრესიის გაცილებით უკეთესი მაჩვენებლები, ვიდრე მხოლოდ ჰაფმანის კოდების ან არითმეტიკული კოდირების გამოყენებისას.

3.6. ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირება ცალკეული ფრაგმენტების მიხედვით

მოცემული საცდელი გამოსახულებების დამუშავების შემდეგ მიღებული შედეგების მიხედვით დადგინდა, რომ გამოსახულებების ზოგიერთ ფრანგმენტებში შესაძლებელია უკეთესი შედეგების მიღება კოდირების სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებისას. ამის საფუძველზე დამუშავდა ადაპტური მეთოდი, რომელიც ითვალისწინებს მოცემული გამოსახულების ფრანგმენტებში საუკეთესო მონაცემების მქონე კოდირების მეთოდის გამოყენებას. ამისათვის ყოველი ფრანგმენტისათვის გათვალისწინებულია თითო ბიტი იმის გასარკვევად, თუ კოდირების რომელ მეთოდს (არსებულსა თუ ზონურს ან არსებულსა თუ ზონურს სტატისტიკის გათვალისწინებით) გამოვიყენებთ. პირველ მათგანს ვუწოდოთ ადაპტური-1, ხოლო მეორეს – ადაპტური-2. რადგან სიკაშკაშის შემდგენისათვის ფრაგმენტების რაოდენობაა 1024, კოდირების ვარიანტის აღსანიშნავად საჭიროა 1024 ბიტი, ხოლო ფერსხვაობითებიდან თითოეულისათვის – 256 ბიტი (სრული სიგნალისათვის – 1536 ბიტი).

მოცემული მეთოდით დამუშავების შედეგები სამივე შემდგენისათვის არსებული ადაპტური მეთოდის ორივე ვარიანტისათვის მოყვანილია ცხრილ 27-ში, ცხრილ 28-ში და ცხრილ 29-ში. როგორც 27-ე ცხრილიდან ჩანს, საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის Y შემდგენის ადაპტური-1 ვარიანტით კოდირებისას კარგი შედეგი მიღებულია მხოლოდ გამოსახულებებისათვის “თი-ბი-სი”, “ტბა” და “ტექსტი”. კერძოდ, ამ უკანასკნელისათვის არსებული მეთოდით კოდირებისას საჭიროა 39484 ბიტი, ხოლო ადაპტური-1 მეთოდით კოდირებისას – 38641 ბიტი, ანუ 843 ბიტით ნაკლები. შესაბამისად პროცენტულად მოგებამ შეადგინა 2,14 %. ადაპტური-2 ვარიანტით კოდირება საუკეთესო შედეგს იძლევა მხოლოდ გამოსახულების “ციხესიმაგრე” Y შემდგენისათვის. C_r შემდგენისათვის ყველაზე კარგი შედეგი აღმოჩნდა მხოლოდ გამოსახულებისათვის “კენკრა” იმ შემთხვევაში, როდესაც გამოყენებულია ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირება (ცხრილი 28). რაც შეეხება ფერსხვაობითი C_b შემდგენს (იხ. ცხრილი 29), მისთვის ადაპტური კოდირების არცერთი ვარიანტი არ იძლევა სასურველ შედეგს.

ცხრილი 27. საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის Y შემდგენებისათვის არსებული, ზონური, ზონური სტატისტიკის გათვალისწინებით, ადაპტური 1 და ადაპტური 2 კოდირების მეთოდების შედეგად მიღებული გამოსახულებათა კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა ტრანსფორმანტას ელემენტთა ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებისას.

გამოსახულებები	ჰორიზონტალური ზიგზაგ-სკანირება					ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირება				
	$Y_{\text{ა}}$	$Y_{\text{ზ}}$	$Y_{\text{ს}}$	$Y_{\text{ად1}}$	$Y_{\text{ად2}}$	$Y_{\text{ა}}$	$Y_{\text{ზ}}$	$Y_{\text{ს}}$	$Y_{\text{ად1}}$	$Y_{\text{ად2}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	55771	57654	57042	56181	56198	**55586**	57668	57083	55956	55995
“ბიონსე”	**52668**	54680	54300	53102	53167	52693	54755	54388	53066	53123
“ბუნება”	69692	72746	72227	70098	70178	**69179**	72760	72147	69762	69854
“ნაგაზი”	52845	54257	53877	53140	53191	**52736**	54195	53832	52899	52961
“თი-ბი-სი”	44978	45460	45161	44127	44206	44831	45600	45301	**44057**	44155
“კატა”	61743	64280	63917	62074	62186	**61717**	64313	63909	62134	62241
“ციხესიმაგრე”	62916	64843	63808	62200	62168	62724	64804	63769	62044	**62032**
“ბავშვები”	82773	86367	85545	83210	83259	**82554**	86500	85678	83112	83165
“ალუბლები”	64684	67513	67157	65221	65349	**64581**	67562	67247	65177	65295
“კროსი”	94288	98272	97045	94546	94498	**93816**	98211	96845	94228	94158
“ფერმა”	76646	79971	79296	77180	77244	**76408**	79972	79260	77004	77046
“პარკი”	**62080**	64718	64216	62370	62438	62519	65116	64612	62673	62742
“კენკრა”	104691	112228	110979	105389	105546	**104623**	112221	110972	105388	105527

ცხრილი 27. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	29594	29535	29467	29681	29791	**29287**	29428	29364	29503	29611
“ზამთარი”	66563	68390	67255	66572	66554	**66399**	68251	67245	66524	66504
“გარნიტური”	44381	44932	44745	44367	44396	**43532**	44751	44550	43882	43915
“შროშანი”	80953	86196	85040	81577	81693	**80725**	86089	85148	81347	81471
“მთები”	16811	16294	15477	16777	16252	16280	16287	**15467**	16686	16212
“ტბა”	35982	35804	35465	35127	35210	35651	35731	35384	**34929**	35013
“მაღაზია”	68379	70272	69803	68400	8449	**67603**	70055	69611	67902	67946
“კარუსელი”	49322	51258	50851	49694	49781	**49122**	51176	50805	49537	49630
“შემოდგომა”	**103086**	110153	108783	103631	103768	103270	110329	108811	103816	103949
“კოშკი”	77958	81586	81056	78273	78315	**77760**	81648	81017	78259	78325
“კოლიზეუმი”	79561	82904	82485	80028	80075	**79522**	83044	82621	80040	80080
“ტექსტი”	39484	38877	39038	**38641**	38818	38991	39131	39292	38691	38868
“ფონი”	8307	4910	**4805**	5913	5829	8078	4906	4807	5897	5831
“ღრუბელი”	22520	21949	**21729**	21891	21877	22547	22048	21881	21965	21957
“მამადავითი”	43326	43761	43675	43623	43656	**43242**	43835	43768	43565	43602
“ფუნიკულორი”	39769	40469	40165	39890	39946	**39686**	40526	40222	39874	39914
“ტელეანძა”	23863	23102	22877	23019	23040	23514	22925	**22675**	22736	22750

ცხრილი 28. საცდელი გამოსახულებების ფერსხვაობის C_r შემდგენებისათვის არსებული, ზონური, ზონური სტატისტიკის გათვალისწინებით, ადაპტური 1 და ადაპტური 2 კოდირების მეთოდების შედეგად მიღებული გამოსახულებათა კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა ტრანსფორმანტას ელემენტთა ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებისას.

გამოსახულებები	ჰორიზონტალური ზიგზაგ-სკანირება					ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირება				
	$C_{rა}$	$C_{rზ}$	$C_{rს}$	$C_{rად1}$	$C_{rად2}$	$C_{rა}$	$C_{rზ}$	$C_{rს}$	$C_{rად1}$	$C_{rად2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	4108	4167	**4082**	4263	4247	4105	4232	4105	4244	4239
“ბიონსე”	4046	4111	4069	4202	4206	**4018**	4110	4035	4170	4180
“ბუნება”	2756	2749	**2654**	2854	2865	2712	2753	2663	2832	2852
“ნაგაზი”	2215	2110	2009	2197	2180	2261	2088	**1987**	2235	2214
“თი-ბი-სი”	1220	758	774	1003	1020	1207	**758**	771	991	1007
“კატა”	3030	2863	2826	2985	2983	2975	2832	**2795**	2942	2935
“ციხესიმაგრე”	1891	1633	**1606**	1801	1805	1883	1644	**1617**	1793	1799
“ბავშვები”	4131	4193	4135	4247	4255	**4092**	4231	4167	4238	4246
“ალუბლები”	**7524**	8338	7779	7684	7646	7569	8399	7901	7751	7706
“კროსი”	**5921**	7097	5890	6106	5909	5924	7533	6115	6082	6001
“ფერმა”	3423	3398	3338	3544	3509	3375	3386	**3326**	3529	3499
“პარკი”	**5440**	6563	5666	5585	5579	5503	7748	5864	5648	5639
“კენკრა”	4700	5989	4659	4635	4675	4689	5934	4640	**4627**	4689

ცხრილი 28. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	5503	7102	5770	5662	5572	**5391**	6219	5588	5584	5537
“ზამთარი”	3017	2995	2782	3148	3003	2970	2976	**2763**	3116	2982
“გარნიტური”	3582	3584	3490	3701	3674	3520	3533	**3446**	3651	3632
“შროშანი”	**5460**	6687	5763	5634	5669	5473	7418	5936	5675	5719
“მთები”	1655	1287	**1284**	1532	1540	1450	1297	1286	1436	1439
“ტბა”	3219	3730	**3084**	3275	3290	3156	3572	**3093**	3276	3281
“მაღაზია”	5052	6979	6275	5204	5221	**5038**	6481	5799	5202	5225
“კარუსელი”	4889	6992	5603	5003	5043	**4880**	7196	5478	4986	5044
“შემოდგომა”	3118	3056	2983	3237	3190	3041	3049	**2976**	3183	3146
“კოშკი”	2651	2593	**2512**	2764	2711	2617	2617	2551	2757	2728
“კოლიზეუმი”	3360	3333	**3312**	3498	3490	3431	3336	3315	3522	3517
“ტექსტი”	1966	1771	**1679**	1903	1873	1928	1780	1724	1868	1864
“ფონი”	1164	658	658	914	914	1158	658	**655**	914	911
“ღრუბელი”	2076	1866	1824	2023	2026	2047	1865	**1822**	1992	1993
“მამადავითი”	2047	1805	**1785**	2010	2003	2043	1809	1789	2007	2001
“ფუნიკულორი”	1758	1442	**1428**	1662	1662	1725	1443	1429	1646	1647
“ტელეანძა”	1988	1730	1717	1881	1893	1942	1715	**1704**	186	1878

ცხრილი 29. საცდელი გამოსახულებების ფერსხვაობის $C_{\text{ხ}}$ შემდგენებისათვის არსებული, ზონური, ზონური სტატისტიკის გათვალისწინებით, ადაპტური 1 და ადაპტური 2 კოდირების მეთოდების შედეგად მიღებული გამოსახულებათა კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა ტრანსფორმანტას ელემენტთა ზიგზაგ-ჰორიზონტალური და ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებისას.

გამოსახულებები	ჰორიზონტალური ზიგზაგ-სკანირება					ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირება				
	$C_{\text{ხა}}$	$C_{\text{ხზ}}$	$C_{\text{ხს}}$	$C_{\text{ხად1}}$	$C_{\text{ხად2}}$	$C_{\text{ხა}}$	$C_{\text{ხზ}}$	$C_{\text{ხს}}$	$C_{\text{ხად1}}$	$C_{\text{ხად2}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	4323	4439	**4310**	4418	4454	4346	4495	4363	4486	4472
“ბიონსე”	4597	4743	4646	4756	4740	**4596**	4732	4603	4747	4726
“ბუნება”	3160	3078	**3036**	3259	3239	3097	3084	3042	3240	3218
“ნაგაზი”	2598	2534	2517	2710	2708	2632	2504	**2487**	2717	2716
“თი-ბი-სი”	1321	878	**868**	1118	1116	1312	878	**868**	1184	1124
“კატა”	3692	3975	3795	3798	3815	**3631**	3792	3648	730	3741
“ციხესიმაგრე”	3534	3587	3490	3658	3640	3523	3598	**3457**	3651	3645
“ბავშვები”	5711	6015	5932	5857	5865	**5692**	6020	6010	5870	5888
“ალუბლები”	5174	5352	5215	5330	5296	**5154**	5344	5157	5295	5257
“კროსი”	6142	7470	6170	6315	6173	**6131**	7743	6379	6308	6236
“ფერმა”	3961	3975	3908	4109	4076	3945	3960	**3893**	4098	4068
“პარკი”	**8874**	14029	11409	9041	9105	9117	14281	11641	9275	9344
“კენკრა”	3221	4097	**2960**	3138	3147	3192	4080	2970	3115	3137

ცხრილი 29. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	3375	3285	**3257**	3461	3470	3265	3319	272	3411	3417
“ზამთარი”	4286	4457	4336	4456	4435	**4267**	4498	4353	4462	4463
“გარნიტური”	3099	3009	**2903**	3193	3119	3049	2994	2918	3165	3113
“შროშანი”	**9310**	14808	11282	9512	9534	9371	13610	11204	9569	9578
“მთები”	1627	1232	**1223**	1483	1479	1451	1240	1224	1401	1394
“ტბა”	3108	2927	**2927**	3066	3080	3040	2937	2937	3018	3036
“მაღაზია”	3387	3477	**3379**	3535	3535	3380	3449	3379	3525	3516
“კარუსელი”	**7952**	12496	10854	8087	8115	8007	12440	10811	8146	8164
“შემოდგომა”	3998	4074	3982	4137	4123	**3899**	4076	4005	4070	4076
“კოშკი”	2779	2685	**2599**	2861	2808	2718	2677	2616	2834	2798
“კოლიზეუმი”	4039	4062	**4023**	4190	4175	4106	4064	4025	4223	4205
“ტექსტი”	1959	1764	**1681**	1896	1867	1931	1784	1731	1871	1870
“ფონი”	1180	**676**	679	932	932	1178	**676**	679	932	935
“ღრუბელი”	2305	2138	2072	2280	2270	2262	2133	**2067**	2236	2222
“მამადავითი”	2649	2613	**2529**	2786	2747	2560	2614	2530	2794	2751
“ფუნიკულორი”	2681	2571	**2520**	2763	2732	2647	2593	2542	2764	2735
“ტელეანძა”	2472	2280	2265	2425	2434	2423	2263	**2248**	2376	2392

4. არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირების შეხამება მთავარი კოეფიციენტების ადაპტურ კოდირებასთან

4.1. ტრანსფორმანტების მთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირება

წინა პარაგრაფებში განხილულია ფერადი გამოსახულებების დისკრეტულ კოსინუსური გარდასახვის შედეგად მიღებული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირება, რომლის შედეგებითაც გამომდინარეობს, რომ შემოთავაზებული ადაპტური კოდირება მნიშვნელოვან ეფექტს იძლევა სხვადასხვა გამოსახულებების დამუშავების დროს. იგივე მიდგომით შესაძლებელია შედეგის გაუმჯობესება გამოსახულებათა მთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირებით. მთლიანი ფერადი გამოსახულებისათვის უფრო ეფექტური აღმოჩნდება მისი მთავარი და არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირების მეთოდების შეხამება.

ადაპტური კოდირების ალგორითმის მიხედვით ორგანზომილებიანი ტრანსფორმანტების ჰორიზონტალური ან ვერტიკალური მიმართულებით გამოთვლილი მთავარი კოეფიციენტების სხვაობითი მნიშვნელობების ორგანზომილებიანი მასივის ელემენტების შემდგომი უდანაკარგო კოდირება ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებით ხდება ან კოეფიციენტების სკანირების გარეშე (არსებული ვარიანტი) ან სკანირების შემდგომი ოთხი ვარიანტიდან კომპრესიის თვალსაზრისით ერთ-ერთი საუკეთესოს საშუალებით: ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირება; ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირება; ჰორიზონტალური სკანირება; ვერტიკალური სკანირება (5 ვარიანტი სკანირების გარეშე კოდირებასთან ერთად) [53].

მთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირების ეფექტურობის მაჩვენებლები ფერადი გამოსახულებების სამივე შემდგენისათვის მოყვანილია ცხრილებში 30, 31 და 32.

ცხრილი 30. მთავარი ელემენტების სხვაობების ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებისას საჭირო სიმბოლოების რაოდენობა სხვაობების მასივის სკანირების სხვადასხვა ვარიანტისათვის საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის Y შემდგენისათვის

გამოსა-ხულებები	კოდირება სკანირების გარეშე		კოდირება ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირებისას		კოდირება ზიგზაგ-ვერტიკალური სკანირებისას		კოდირება ჰორიზონტალური სკანირებისას		კოდირება ვერტიკალური სკანირებისას	
	$M_{1Y\text{სკ.გ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{სკ.გ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ჰზსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ჰზსკვ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ვზსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ვზსკ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ჰსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ჰსკ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ვსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Y\text{ვსკ..ვ}}$, ბიტი
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	7726	5922	7178	5526	7169	5513	7172	**5512**	7154	5538
“ბიონსე”	6832	6650	6342	6163	6332	6153	6276	**6096**	6317	6157
“ბუნება”	6558	6954	5989	6383	6008	6377	**5990**	6348	6001	6382
“ნაგაზი”	6864	5702	6407	5450	6381	5385	6397	5386	6319	**5377**
“თი-ბი-სი”	4796	5086	4651	4807	4633	4844	4641	4791	**4546**	4759
“კატა”	5730	6416	5624	6180	**5607**	6131	5541	6071	5547	6133
“ციხესიმაგრე”	4528	4948	4207	4648	4132	4548	**3801**	4186	4084	4513
“ბავშვები”	7012	7320	6470	6607	6464	6621	6480	6612	**6448**	6617
“ალუბლები”	7418	7756	6886	7146	6899	7148	6898	7154	**6871**	7175
“კროსი”	7534	6764	6976	6204	6982	6180	6971	6179	6941	**6167**
“ფერმა”	7874	8406	7312	7925	7311	7885	**7283**	7843	7295	7907
“პარკი”	7338	5930	7023	5586	6981	5571	7002	5586	6933	**5539**
“კენკრა”	6908	7050	**6254**	6380	6255	6384	6269	6371	6264	6366

ცხრილი 30. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	4770	5506	4451	5090	4432	5108	4381	4992	**4371**	5112
“ზამთარი”	5092	5730	4724	5263	4730	5290	4698	5263	**4697**	5275
“გარნიტური”	5044	6448	4777	5979	4765	6019	4761	5911	**4717**	6025
“შროშანი”	7988	8190	7366	7616	7381	7614	7362	7586	**7343**	7609
“მთები”	**1750**	3552	1851	3489	1848	3485	1813	3290	1839	3529
“ტბა”	**2122**	3789	3680	4784	3632	4782	3503	4653	3622	4838
“მაღაზია”	5700	6620	5397	7162	5398	7163	**5308**	7098	5338	7181
“კარუსელი”	4468	4814	**4263**	4528	4294	4526	4312	4536	4270	4560
“შემოდგომა”	6682	6716	6154	6086	6158	6075	6154	**6049**	6175	6107
“კოშკი”	5958	6831	5626	7481	5642	7481	**5535**	7414	5583	7449
“კოლიზეუმი”	7490	7636	6909	6951	6926	6940	6924	6926	**6887**	6953
“ტექსტი”	3806	6326	3719	5900	3708	5884	**3660**	5784	3706	5896
“ფონი”	**2096**	2532	2249	2641	2269	2643	2268	2635	2227	2760
“ღრუბელი”	4140	4648	4018	4415	4023	4434	3985	4337	**3977**	4399
“მამადავითი”	5560	5634	5065	5144	5061	5100	5067	5109	**5051**	5113
“ფუნიკულორი”	4696	5336	4458	4985	4513	4998	4471	4928	**4448**	5028
“ტელეანძა”	3680	3750	3604	3629	3597	3633	3599	3589	**3538**	3662

ცხრილი 31. მთავარი ელემენტების სხვაობების ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებისას საჭირო სიმბოლოების რაოდენობა სხვაობების მასივის სკანირების სხვადასხვა ვარიანტისათვის საცდელი გამოსახულებების ფერსხვაობითი C_r შემდგენისათვის

გამოსა-ხულებები	კოდირება სკანირების გარეშე		კოდირება ჰორიზონტალური ზიგზაგ-სკანირებისას		კოდირება ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირებისას		კოდირება ჰორიზონტალური სკანირებისას		კოდირება ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირებისას	
	$M_{1Cr\text{ს.კ.გ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ს.კ.გ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ჰზსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ჰზსკვ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ვზსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ვზსკ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ჰსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ჰსკ.ვ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ვსკ.ჰ}}$, ბიტი	$M_{1Cr\text{ვსკ..ვ}}$, ბიტი
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	1198	**1024**	1257	1087	1257	1084	1255	1082	1243	1083
“ბიონსე”	1134	**1076**	1204	1168	1207	1150	1203	1135	1194	1154
“ბუნება”	**808**	942	888	1006	882	1010	892	991	888	1015
“ნაგაზი”	780	**636**	852	694	852	705	858	677	805	691
“თი-ბი-სი”	366	382	371	391	370	395	**270**	296	335	376
“კატა”	**820**	958	902	1044	900	1029	888	984	864	1040
“ციხესიმაგრე”	578	588	625	632	625	629	556	**533**	594	626
“ბავშვები”	**1004**	1082	1070	1143	1074	1142	1072	1126	1073	1129
“ალუბლები”	**1536**	1604	1564	1619	1564	1629	1569	1623	1570	1632
“კროსი”	1486	**1070**	1526	1142	1527	1134	1516	1128	1522	1140
“ფერმა”	**932**	970	1010	1058	1019	1053	1002	1037	1003	1041
“პარკი”	1274	**1034**	1332	1088	1341	1090	1328	1097	1326	1092
“კენკრა”	768	730	821	767	813	778	784	761	796	**725**

ცხრილი 31. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	1266	1570	1323	1568	1318	1572	1320	1567	1322	1571
“ზამთარი”	742	868	823	947	820	945	836	924	823	951
“გარნიტური”	930	1234	1013	1295	1014	1288	1008	1267	1011	1296
“შროშანი”	1246	1316	1290	1358	1296	1373	1302	1377	1296	1377
“მთები”	374	910	367	972	348	974	372	905	349	989
“ტბა”	742	1240	812	1309	806	1306	804	1265	818	1309
“მაღაზია”	914	1200	1017	1252	1025	1259	1017	1259	983	1243
“კარუსელი”	956	1030	987	1050	971	1045	1024	1077	975	1070
“შემოდგომა”	810	918	878	971	874	976	872	958	856	980
“კოშკი”	698	932	780	1012	791	1020	772	992	797	1006
“კოლიზეუმი”	1092	872	1160	954	1159	958	1165	954	1157	949
“ტექსტი”	330	422	324	453	271	379	183	256	307	431
“ფონი”	384	404	371	388	381	385	370	397	363	395
“ღრუბელი”	700	788	751	870	777	861	726	812	755	867
“მამადავითი”	690	738	768	794	768	802	758	782	757	807
“ფუნიკულორი”	540	674	580	754	573	747	578	704	581	756
“ტელეანძა”	650	592	724	651	723	665	711	628	678	656

ცხრილი 32. მთავარი ელემენტების სხვაობების ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებისას საჭირო სიმბოლოების რაოდენობა სხვაობების მასივის სკანირების სხვადასხვა ვარიანტისათვის საცდელი გამოსახულებების ფერსხვაობითი C_b შემდგენისათვის

გამოსა-ხულებები	კოდირება სკანირების გარეშე		კოდირება ჰორიზონტალური ზიგზაგ-სკანირებისას		კოდირება ვერტიკალური ზიგზაგ-სკანირებისას		კოდირება ჰორიზონტალური სკანირებისას		კოდირება ვერტიკალური სკანირებისას	
	$M_{1Cb სკ.გ.ჰ}$, ბიტი	$M_{1Cb სკ.გ.ვ}$, ბიტი	$M_{1Cb ჰზსკ.ჰ}$, ბიტი	$M_{1Cb ჰზსკვ}$, ბიტი	$M_{1Cb ვზსკ.ჰ}$, ბიტი	$M_{1Cb ვზსკ.ვ}$, ბიტი	$M_{1Cb ჰსკ.ჰ}$, ბიტი	$M_{1Cb ჰსკ.ვ}$, ბიტი	$M_{1Cb ვსკ.ჰ}$, ბიტი	$M_{1Cb ვსკ..ვ}$, ბიტი
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“ლენა”	1352	1008	1407	1087	1413	1088	1403	1082	1399	1087
“ბიონსე”	1152	1150	1231	1228	1229	1220	1207	1211	1217	1216
“ბუნება”	892	1080	981	1160	967	1153	964	1129	961	1159
“ნაგაზი”	868	684	946	767	942	758	934	753	930	763
“თი-ბი-სი”	422	458	460	474	444	471	438	464	465	427
“კატა”	926	1042	1015	1140	1021	1139	990	1120	1006	1148
“ციხესიმაგრე”	750	830	789	874	791	846	712	797	807	867
“ბავშვები”	1296	1264	1345	1300	1354	1308	1355	1298	1337	1300
“ალუბლები”	1160	1148	1210	1205	1213	1211	1207	1205	1210	1220
“კროსი”	1480	1130	1533	1209	1528	1192	1504	1184	1517	1197
“ფერმა”	1070	1084	1148	1159	1137	1171	1142	1140	1132	1159
“პარკი”	1572	1226	1537	1251	1535	1253	1539	1243	1534	1265
“კენკრა”	646	596	687	639	688	652	665	632	673	627

ცხრილი 32. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
“დაისი”	980	1282	1045	1322	1046	1320	1049	1306	1031	1316
“ზამთარი”	934	1044	1002	1107	995	1110	997	1095	1001	1110
“გარნიტური”	804	1102	886	1172	898	1164	877	1133	874	1174
“შროშანი”	1682	1782	1711	1810	1713	1810	1715	1808	1714	1817
“მთები”	398	932	394	999	392	998	391	946	387	1010
“ტბა”	700	1062	754	1117	755	1114	744	1083	786	1122
“მაღაზია”	764	934	849	998	845	1001	847	984	833	891
“კარუსელი”	1146	1232	1175	1260	1171	1263	1196	1278	1175	1281
“შემოდგომა”	924	1030	998	1104	989	1098	999	1077	980	1107
“კოშკი”	736	968	802	1046	803	1029	798	1029	798	1047
“კოლიზეუმი”	1192	952	1258	1022	1265	1026	1265	1017	1242	1027
“ტექსტი”	332	426	350	466	274	387	180	268	307	432
“ფონი”	402	408	407	402	406	405	397	403	386	389
“ღრუბელი”	786	892	852	955	875	949	833	916	833	937
“მამადავითი”	846	882	923	959	916	955	915	939	905	963
“ფუნიკულორი”	732	954	795	1018	788	1038	786	1005	787	1031
“ტელეანძა”	842	746	914	822	904	807	925	804	885	819

4.2. ფერად გამოსახულებათა ტრანსფორმანტების არამთავარი და მთავარი კოეფიციენტების ადაპტურ კოდირების ალგორითმების შეხამება

ფერად გამოსახულებათა ტრანსფორმანტების არამთავარი და მთავარი კოეფიციენტების ადაპტურ კოდირების ალგორითმების შეხამებით (ცხრილი 27, 28, 29, 30, 31 და 32) დადგინდა, რომ მისი საშუალებით შესაძლებელია მიღებულ იქნას უფრო კარგი კომპრესიის მაჩვენებლები, ვიდრე არსებული მეთოდით კოდირებისას. გარდა ამისა, შემოთავაზებული ადაპტური მეთოდით კოდირებისას, გამოსახულების სრული სიგნალისათვის კოდირების საუკეთესო ვარიანტის შერჩევის შემთხვევაში საჭირო სიმბოლოების ჯამური (სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r და C_b შემდგენების ჯამი) რაოდენობის გამოთვლისას გათვალისწინებულია გამოსახულებების შესაბამისი როგორც არამთავარი, ასევე მთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირების ვარიანტის არჩევისათვის საჭირო დამატებითი (საინფორმაციო) ბიტების რაოდენობა (13 ბიტი) (ცხრილი 33).

ცხრილში ფერადი გამოსახულების არსებული მეთოდით კოდირებისას დახარჯული სიმბოლოების რაოდენობა აღნიშნულია $M_{არ}$-ით, ადაპტური მეთოდით კოდირებისას – $M_{ად}$-ით, კომპრესიის ფაქტორები – შესაბამისად $F_{არ}$-ით და $F_{ად}$-ით, ხოლო გამოსახულების ერთ ელემენტზე (პიქსელზე) დახარჯული ბიტების რაოდენობა – $P_{არ}$-ით და $P_{ად}$-ით. როგორც 33-ე ცხრილიდან ჩანს, ყველა საცდელი გამოსახულებისათვის შემოთავაზებული ადაპტური მეთოდით კოდირებისას მიიღება უკეთესი შედეგი, ვიდრე არსებული მეთოდის გამოყენების დროს.

საცდელად შერჩეული სხვადასხვა დეტალობის მქონე გამოსახულებებს შორის ყველაზე საუკეთესო შედეგი აქვს ძალზე მცირე დეტალობის მქონე გამოსახულებას ”ფონი” ($F_{ად}$=21,589, $P_{ად}$=1,112), რაც განპირობებულია იმ გარემოებით, რომ ამ გამოსახულებაში ძალზე მცირე დეტალობის გარდა, არ არის ფერთა შორის მკვეთრი გადასვლა (კონტურები).

ცხრილი 33. შემოთავაზებული ადაპტური კოდირებების მეთოდებით, გამოსახულებების სამივე შემდგენის, როგორც მთავარი, ასევე არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა, კომპრესიის ფაქტორი და ერთ ელემენტზე დახარჯული ბიტების რაოდენობა.

გამოსახულება	$M_{\text{არ}}$	$M_{\text{ად}}$	$M_{\text{არ}}$-$M_{\text{ად}}$	$F_{\text{არ}}$	$F_{\text{ად}}$	$P_{\text{არ}}$	$P_{\text{ად}}$
1	2	3	4	5	6	7	8
“ლენა”	64202	**61198**	3004	24.499	**25.701**	0.980	**0.934**
“ბიონსე”	61311	**60559**	752	25.654	**25.972**	0.936	**0.924**
“ბუნება”	75608	**74159**	1449	20.803	**21.209**	1.154	**1.132**
“ნაგაზი”	57658	**55262**	2396	27.279	**28.462**	0.880	**0.843**
“თი-ბი-სი”	47519	**45689**	1830	33.100	**34.425**	0.725	**0.697**
“კატა”	68465	**67835**	630	22.973	**23.187**	1.045	**1.035**
“ციხესიმაგრე”	68341	**66210**	2131	23.015	**23.756**	1.043	**1.010**
“ბავშვები”	92615	**91709**	906	16.983	**17.151**	1.413	**1.399**
“ალუბლები”	77382	**76725**	657	20.326	**20.500**	1.181	**1.171**
“კროსი”	106351	**104098**	2253	14.789	**15.109**	1.623	**1.588**
“ფერმა”	84030	**82904**	1126	18.718	**18.972**	1.282	**1.265**
“პარკი”	76394	**74022**	2372	20.589	**21.249**	1.166	**1.129**
“კენკრა”	112612	**111381**	1231	13.967	**14.121**	1.718	**1.700**
“დაისი”	38472	**37179**	1293	40.883	**42.305**	0.587	**0.567**

ცხრილი 33. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8
“ზამთარი”	73866	**72856**	1010	21.293	**21.589**	1.127	**1.112**
“გარნიტური”	51062	**49390**	1672	30.803	**31.846**	0.779	**0.754**
“შროშანი”	95723	**94863**	860	16.431	**16.580**	1.461	**1.447**
“მთები”	20093	**17963**	2130	78.279	**87.561**	0.307	**0.274**
“ტბა”	42309	**40828**	1481	37.176	**38.524**	0.646	**0.623**
“მაღაზია”	76818	**75274**	1544	20.475	**20.895**	1.172	**1.149**
“კარუსელი”	62163	**61688**	475	25.302	**25.497**	0.949	**0.941**
“შემოდგომა”	110202	**109167**	1035	14.273	**14.408**	1.682	**1.666**
“კოშკი”	83388	**82542**	846	18.862	**19.055**	1.272	**1.259**
“კოლიზეუმი”	86960	**85666**	1294	18.087	**18.360**	1.327	**1.307**
“ტექსტი”	43409	**41633**	1776	36.234	**37.779**	0.662	**0.635**
“ფონი”	10651	**6121**	4530	147.673	**256.962**	0.163	**0.093**
“ღრუბელი”	26901	**25328**	1573	58.469	**62.100**	0.410	**0.386**
“მამადავითი”	48022	**46912**	1110	32.753	**33.528**	0.733	**0.716**
“ფუნიკულორი”	44208	**43303**	905	35.579	**36.322**	0.675	**0.661**
“ტელეანძა”	28323	**26208**	2115	55.533	**60.015**	0.432	**0.400**

ყველაზე ცუდი, მაგრამ საერთო ჯამში მაინც დადებითი შედეგი, როგორც მოსალოდნელი იყო, აქვს მაღალი დეტალობის მქონე საცდელ გამოსახულებას ”ზამთარი” ($F_{ად}$=256,962, $P_{ად}$=0.093). ასეთი შედეგი, მაღალ დეტალობასთან ერთად, განპირობებულია მასში არსებულ ფერთა შორის მკვეთრი გადასვლებით.

4.3. შეცდომების გავლენის შეფასება ტრანსფორმანტების მთავარი და არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კოდირების მეთოდისას გამოყენებულ საინფორმაციო (ჭარბ) სიმბოლოებზე

მე-10 სურათზე ნაჩვენებია კომპრესირებული გამოსახულება “ლენა” საინფორმაციო სიმბოლოების დამახინჯების გარეშე (ა) და სიკაშკაშის Y (ბ) და ფერსხვაობითი C_r (გ) და C_b (დ) შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური კომპაქტური კოდირების ვარიანტის შესახებ საინფორმაციო (ჭარბი) სიმბოლოების დამახინჯებისას.

მე-11 სურათზე ნაჩვენებია ის შემთხვევა, როდესაც ადაპტური მეთოდით კოდირებისას, ერთდროულად მახინჯდება ინფორმაცია ან მხოლოდ სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_r (ა) ან მხოლოდ სიკაშკაშის Y და ფერსხვაობითი C_b შემდგენების (ბ) შესახებ.

მე-12 სურათზე ნაჩვენებია ის შემთხვევა, როდესაც ადაპტური მეთოდით კოდირებისას ერთდროულად მახინჯდება ინფორმაცია ან მხოლოდ ფერსხვაობების C_r და C_b შემდგენების (ა) ან ინფორმაცია სამივე შემდგენის შესახებ (ბ).

აღდგენილი გამოსახულების ხარისხზე საინფორმაციო სიმბოლოების დამახინჯების გავლენის გაუვნებელყოფა შესაძლებელია საინფორმაციო სიმბოლოების რამდენჯერმე (მაგალითად, 3-ჯერ) გამეორებით (გადაცემით, შენახვით).

ა

ბ

გ

დ

სურ. 10. კომპრესირებული გამოსახულება “ლენა”: დამახინჯების გარეშე (ა); სიკაშკაშის Y-ის დამახინჯებისას (ბ); ფერსხვაობითი C_r-ის დამახინჯებისას (გ); ფერსხვაობითი C_b-ის დამახინჯებისას (დ)

ა

ბ

სურ. 11. კომპრესირებული გამოსახულება “ლენა”: სიკაშკაშის Y-ის და ფერსხვაობითი C_r-ის დამახინჯებისას (ა); სიკაშკაშის Y-ის და ფერსხვაობითი C_b-ის დამახინჯებისას (ბ)

ა ბ

სურ. 12. კომპრესირებული გამოსახულება “ლენა”: ფერსხვაობითების C_r-ის და C_b-ის დამახინჯებისას (ა); სამივე შემდგენის Y, C_r, C_b-ს დამახინჯებისას (ბ)

4.4. კომპაქტურად კოდირებულ გამოსახულებათა ხარისხის შეფასება ობიექტური და სუბიექტური კრიტერიუმების საფუძველზე

ნაშრომში დამუშავებული გამოსახულებათა სიგნალების კომპაქტური კოდირების მეთოდის ეფექტურობა შეფასებულია ექსპერიმენტულად მისი მოდელირების საშუალებით. ექსპერიმენტისთვის გამოყენებულია სხვადასხვა კლასის (ძალიან მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობის) ფერადი საცდელი (საცდელი) გამოსახულებები (იხ. § 1.4).

სურ. 13-ზე წარმოდგენილია წინამდებარე სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებული მეთოდებიდან საუკეთესო ვარიანტის საფუძველზე დამუშავებული (კომპაქტურად კოდირებული) საცდელი (საცდელი) გამოსახულებები.

ა ბ გ

დ

ე

ვ

ზ

თ

ი

კ

ლ

მ

ნ

ო

პ

ჟ

რ

ს

ტ უ ფ

ქ ღ ყ

შ ჩ ც

ძ წ ჭ

სურ. 13 კომპაქტურად კოდირებული (კომპრესირებული) საცდელი გამოსახულებები: “ლენა (ა)”, “ბიონსე (ბ)”, “ბუნება (გ)”, “ნაგაზი (დ)”, “თი-ბი-სი (ე)”, ”კატა (ვ)”, “ციხესიმაგრე (ზ)”, “ბავშვები (თ)”, “ალუბლები (ი)”, “კროსი (კ)”, ”ფერმა (ლ)”, “პარკი (მ)”, “კენკრა (ნ)”, ”დაისი (ო)”, “ზამთარი (პ)”, “გარნიტური (ჟ)”, ”კროსი (რ)”, “მთები (ს)”, “ტბა (ტ)”, ”მაღაზია (უ)”, “კარუსელი (ფ)”, “შემოდგომა (ქ)”, ”კოშკი (ღ)”, “კოლიზეუმი (ყ)”, “ტექსტი (შ)”, ”ფონი (ჩ)”, “ღრუბელი (ც)”, “მამადავითი (ძ)”, ”ფუნიკულორი (წ)” და ”ტელეანძა (ჭ)”.

კომპაქტური კოდირების (კომპრესიის) შემდეგ აღდგენილი გამოსახულების ხარისხის შეფასებისათვის გამოიყენება როგორც ობიექტური, ასევე სუბიექტური (ადამიანის ფსიქოფიზიოლოგური აღქმის თავისებურებანი) კრიტერიუმები. შეფასების ობიექტური პარამეტრებია: საშუალო კვადრატული შეცდომა – rms; ნორმირებული საშუალო კვადრატული შეცდომა – nskg; სიგნალისა და ხმაურის ფარდობა – SNR; სიგნალისა და ხმაურის ფარდობის პიკური მნიშვნელობა – PSNR

1. საშუალო კვადრატული ცდომილება (MSE):

$$\mathrm{MSE} = \sqrt{(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j) - X^*(i,j))^2)/N^2}$$

2. ამპლიტუდის მიხედვით ნორმირებული საშუალო კვადრატული შეცდომა (NMSE):

$$\mathrm{NMSE} = \sqrt{(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j) - X^*(i,j))^2)/(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j))^2)},$$

3. სიგნალ-ხმაურის ფარდობა (SNR):

$$\mathrm{SNR} = 10\mathrm{Lg}\,(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j))^2)/(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j) - X^*(i,j))^2),$$

4. პიკური სიგნალ-ხმაურის ფარდობა (PSNR):

$$\mathrm{SNRP} = 10\mathrm{Lg}(N^2(L-1)^2)/(\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (X(i,j) - X^*(i,j))^2)$$

სადაც X(i, j) და X*(i, j) საწყისი და კომპრესიის შემდეგ აღდგენილი გამოსახულებების ელემენტების მნიშვნელობებია (ინტენსივობებია); i და j – გამოსახულების ელემენტების კოორდინატებია (i, j=0, 1, 2, ... , N–1), ხოლო L – თითოეული ელემენტის ინტენსივობათა რაოდენობაა და, ამიტომ, ელემენტების ინტენსივობის დიაპაზონია 0, ... ,(L-1). წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში დამუშავებული გამოსახულებებისათვის N=256, ანუ მოდელირებისათვის გამოყენებული ეტალონური გამოსახულებების ზომებია 256x256, ხოლო საწყის გამაოსახულებათა ელემენტებისათვის გამოიყენება 8–თანრიგა კოდირება, რის გამოც L=256 (გამოსახულების თითოეული ელემენტის მნიშვნელობათა დიაპაზონია 0...255).

სადისერტაციო ნაშრომში გამოსახულებათა კოდირების დამუშავებული მეთოდების ექსპერიმენტული მოდელირების შედეგების შეფასება განხორციელდა ყველა ზემოთ ჩამოთვლილი ობიექტური კრიტერიუმებით, რისთვისაც გამოყენებული იქნა პროგრამა MathCad.

საცდელი გამოსახულებებისათვის ხარისხის შეფასების ობიექტური პარამეტრები გამოსახულებათა სამივე შემდგენისა და სრული სიგნალისათვის წარმოდგენილია ცხრილებში 34 და 35.

აღდგენილი გამოსახულებების საშუალო და პიკური საშუალო კვადრატული ცდომილებების ნულისგან განსხვავებული და სიგნალისა და ხმაურის ფარდობის (ისევე როგორც სიგნალისა და ხმაურის ფარდობის პიკური მნიშვნელობების) შემცირებული სიდიდეები განპირობებულია დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის საბაზო მატრიცის ელემენტების წილადური მნიშვნელობებითა და შესაბამისი ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების დაკვანტვით ამ მიზნით ექსპერტთა JPEG და MPEG ჯგუფების მიერ სპეციალურად შერჩეული დაკვანტვის [Q_y] და [$Q_{r,b}$] მატრიცების გამოყენებით (იხ. § 1.1).

აღნიშნული პარამეტრების იდეალურისაგან განსხვავება დასაშვებადაა მიჩნეული ადამიანის მხედველობის ფსიქოფიზიოლოგი-ური თავისებურებების გათვალისწინებით, რაც საფუძვლად დაედო დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების დაკვანტ-ვას [Q_y] და [$Q_{r,b}$] მატრიცების საშუალებით. დაკვანტვა კი რეკომენდებუ-ლია კომპრესიის F ფაქტორის ამაღლების მიზნით დაუკვანტავი ტრანსფორმანტების შემთხვევაში კოდირებასთან შედარებით.

მხედველობის ფსიქოფიზიოლოგიური თავისებურებები გამოსახულებათა სუბიექტური აღქმის თვალსაზრისით გამოიხატება, კერძოდ, იმაში, რომ თვალი ვერ ამჩნევს გამოსახულებათა დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვითა და შესაბამისი ტრანსფორმანტების დაკვანტვით გამოწვეულ უზუსტობებს როგორც შედარებით დიდი დეტალობის შემცველი გამოსახულების ობიექტების კონტურებზე, ასევე მცირე დეტალობის შემცველ და ეგრეთ წოდებულ მონოტონურ (ფონურ) გამოსახულებებზე.

ცხრილი 34. კომპაქტურად კოდირებული (კომპრესირებული) საცდელი გამოსახულებების სიკაშკაშის Y და ფერსვაობითი C_r, C_b, შემდგენების აღდგენის ხარისხის შეფასება ობიექტური პარამეტრების მიხედვით

გამოსახულებები	MSE			NMSE			SNR, დბ			SNRP, დბ		
	Y	C_r	C_b	Y	C_r	C_b	Y	C_r	C_b	Y	C_r	C_b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
“ლენა”	5,145	2,428	2,467	0,039	0,082	0,207	28,242	21,768	13,674	33,937	31,427	31,291
“ბიონსე”	4,817	2,540	3,262	0,032	0,249	0,244	29,941	12,063	12,247	34,509	31,036	28,864
“ბუნება”	7,358	2,355	2,683	0,081	0,286	0,266	21,839	10,862	11,486	30,830	31,693	30,562
“ნაგაზი”	5,501	1,445	1,614	0,040	0,263	0,290	27,839	11,591	10,748	33,356	35,937	34,978
“თი-ბი-სი”	5,250	1,029	1,077	0,029	0,583	0,366	30,838	4,680	8,719	33,762	38,882	38,493
“კატა”	6,194	2,239	2,903	0,043	0,161	0,161	27,265	15,849	15,849	32,325	32,131	32,131
“ციხესიმაგრე”	8,435	1,798	4,207	0,047	0,448	0,430	26,589	6,972	7,331	29,643	34,039	26,654
“ბავშვები”	8,395	2,908	3,753	0,070	0,247	0,179	23,096	12,163	14,929	29,684	29,862	27,646
“ალუბლები”	5,824	4,493	3,817	0,051	0,204	0,369	25,849	13,816	8,668	32,861	25,891	27,499
“კროსი”	9,752	4,742	4,944	0,086	0,349	0,325	21,267	9,153	9,766	28,383	25,614	25,252
“ფერმა”	6,184	2,488	3,081	0,039	0,384	0,389	28,274	8,305	8,199	32,339	31,218	29,359
“პარკი”	5,664	3,851	6,083	0,053	0,300	0,221	25,504	10,458	13,115	33,103	27,422	23,451
“კენკრა”	10,477	6,013	4,870	0,094	0,436	0,665	20,583	7,204	3,543	27,760	23,552	25,383
“დაისი”	3,543	4,261	2,639	0,034	0,086	0,187	29,405	21,339	14,563	37,177	26,544	30,705

ცხრილი 34. (გაგრძელება)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
“ზამთარი”	8,336	2,928	4,203	0,110	0,176	0,158	19,193	15,105	16,018	29,745	29,803	26,662
“გარნიტური”	4,089	2,552	2,345	0,033	0,147	0,200	29,652	16,647	13,987	35,932	30,996	31,732
“შროშანი”	7,166	4,296	6,716	0,079	0,391	0,278	22,018	8,146	11,116	31,059	26,472	22,592
“მთები”	1,117	0,780	0,824	0,006	0,023	0,034	45,090	32,885	29,399	47,206	41,290	40,814
“ტბა”	4,824	2,561	2,604	0,039	0,080	0,113	28,119	21,893	18,912	34,496	30,965	30,820
“მაღაზია”	6,280	5,046	3,174	0,056	0,383	0,444	25,063	8,343	7,044	32,205	25,075	29,102
“კარუსელი”	5,835	4,736	7,439	0,057	0,313	0,295	24,845	10,095	10,611	32,844	25,625	21,704
“შემოდგომა”	9,932	2,884	4,034	0,068	0,284	0,308	23,376	10,937	10,227	28,224	29,935	27,019
“კოშკი”	6,862	2,042	2,469	0,050	0,297	0,259	26,057	10,545	11,747	31,435	32,933	31,284
“კოლიზეუმი”	6,151	2,084	2,336	0,051	0,239	0,219	25,897	12,447	13,173	32,385	32,757	31,764
“ტექსტი”	2,872	1,273	1,312	0,014	0,238	0,253	37,244	12,472	11,953	39,001	37,037	36,776
“ფონი”	1,058	0,853	0,659	0,007	0,047	0,027	43,265	26,580	31,350	47,679	40,516	42,755
“ღრუბელი”	1,967	1,166	1,276	0,010	0,113	0,073	39,777	18,932	22,731	42,288	37,801	37,019
“მამადავითი”	3,166	1,333	1,556	0,033	0,275	0,361	29,709	11,202	8,841	38,155	36,639	35,291
“ფუნიკულორი”	3,453	1,186	1,511	0,021	0,343	0,174	33,721	9,286	15,182	37,402	37,651	35,551
“ტელეანძა”	2,375	1,159	1,307	0,013	0,221	0,090	37,670	13,123	20,889	40,652	37,852	36,808

ცხრილი 35. კომპაქტურად კოდირებული (კომპრესირებული) საცდელი გამოსახულებების აღდგენის ხარისხის შეფასება ობიექტური პარამეტრების მიხედვით გამოსახულებათა სრული სიგნალისათვის

გამოსახულებები	MSE	NMSE	SNR, დბ	SNRP, დბ
1	2	3	4	5
“ლენა”	7,176	0,051	25,885	35,819
“ბიონსე”	6,982	0,045	26,857	31,286
“ბუნება”	8,685	0,088	21,065	29,389
“ნაგაზი”	6,169	0,042	27,452	32,361
“თი-ბი-სი”	5,461	0,030	30,536	33,419
“კატა”	7,609	0,056	24,985	30,538
“ციხესიმაგრე”	8,824	0,049	26,125	29,252
“ბავშვები”	10,162	0,084	21,463	28,025
“ალუბლები”	9,933	0,085	21,457	32,994
“კროსი”	13,447	0,132	17,620	25,592
“ფერმა”	7,549	0,046	26,718	30,607
“პარკი”	9,418	0,075	22,497	28,686
“კენკრა”	10,471	0,080	21,964	27,765
“დაისი”	7,521	0,057	24,901	35,410
“ზამთარი”	9,338	0,169	15,448	28,760
“გარნიტური”	6,506	0,043	27,245	31,899
“შროშანი”	10,913	0,117	18,615	27,406
“მთები”	1.954	0,014	37,200	42,344
“ტბა”	7,150	0,096	20,339	31,079
“მაღაზია”	12,237	0,113	18,932	26,412
“კარუსელი”	11,148	0,134	17,459	27,221
“შემოდგომა”	11,456	0,076	22,382	26,984
“კოშკი”	7,912	0,061	24,299	30,199
“კოლიზეუმი”	7,285	0,055	25,126	30,916
“ტექსტი”	3,761	0,018	34,701	36,660
“ფონი”	1,934	0,016	35,727	42,438
“ღრუბელი”	2,966	0,017	35,519	38,721

ცხრილი 35. გაგრძელება

1	2	3	4	5
“მამადავითი”	4,060	0,044	27,078	35,994
“ფუნიკულორი”	4,134	0,025	32,090	35,836
“ტელეანძა”	3,272	0,019	34,556	37,809

ვინაიდან გამოსახულებათა დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვისა და ტრანსფორმანტების დაკვანტვით გამოწვეული შეცდომები არაარსებითია, ამიტომ ეკონომიური კოდირების (კომპრესიის) ასეთ მეთოდს უწოდებენ კოდირებას ნაწილობრივი დანაკარგებით. რაც შეეხება დაკვანტული ტრანსფორმანტების დამატებით კოდირებას ჰაფმანის ცხრილების (კოდების) გამოყენებით, რაც ხორციელდება კომრესიის F ფაქტორის უფრო მეტად გაზრდის მიზნით, იგი არ იწვევს დამატებითი შეცდომების გაჩენას, რის გამოც ეკონომიურ კოდირებას ჰაფმანის ცხრილების გამოყენებით უწოდებენ უდანაკარგო კოდირებას.

კომპაქტურად კოდირებული გამოსახულებების ხარისხის სუბიექტური შეფასება ემყარება სუბიექტურ-სტატისტიკური ანალიზით მიღებულ 7-ბალიან შედეგებს [54].

ყველა საცდელი გამოსახულებისათვის სუბიექტურ-სტატისტიკური ანალიზის საფუძველზე მიღებული შედეგი აღემატება 6 (მაღალ) ბალს და ნაკლებია 7 (ძალიან მაღალ) ბალზე.

კომპაქტური კოდირების (კომპრესიის) შემდეგ აღდგენილი გამო-სახულების ხარისხის შეფასების როგორც ობიექტურმა, ასევე ადამიანის მხედველობის თავისებურებებზე დაფუძნებულმა სუბიექტურმა კრიტერიუმებმა აჩვენა, რომ მათი შედეგები სრულად ემთხვევა JPEG და MPEG რეკომენდაციებით გათვალისწინებულ მოთხოვნებს.

დასკვნები

ძირითადი შედეგები, რომლებიც მიღებულია სამუშაოს თემატიკასთან დაკავშირებით, შემდეგია:

1. ნაჩვენებია, რომ 256x256 ფორმატის ფერად გამოსახულებათა როგორც სიკაშკაშის, ასევე ფერსხვაობითი შემდგენების შესაბამისი 8x8 ზომის ბლოკების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივების სტატისტიკური მახასიათებლები საექსპერიმენტოდ შერჩეული ყველა გამოსახულებისათვის იძლევა მათი არსებულ მეთოდთან შედარებით უფრო კომპაქტური კოდირების საშუალებას.

2. დამუშავებულია ფერად გამოსახულებათა შესაბამისი ტრანსფორმანტების კომპაქტური ბლოკური კოდირებისა და დეკოდირების ალგორითმები, რომელთა მოდელირების საფუძველზე დადგენილია, რომ შემუშავებული მეთოდი არსებულთან შედარებით კომპრესიის თვალსაზრისით უკეთეს შედეგს იძლევა მხოლოდ ძალზე მცირე დეტალობით გამორჩეული გამოსახულების სამივე შემდგენისათვის (გამოსახულება “ფონი”). მცირე და საშუალო დეტალობის გამოსახულებებს (“ლენა” და “ალუბლები”), კოდირების ბლოკური მეთოდი უკეთესია მხოლოდ გამოსახულებათა სიკაშკაშის შემდგენისათვის. რაც შეეხება მაღალი დეტალობის გამოსახულების (“ზამთარი”) კოდირებისას ბლოკური მეთოდით, ის არსებულ მეთოდთან შედარებით გამოირჩევა უარესი მაჩვენებლებით გამოსახულების სამივე შემდგენისათვის.

3. დამუშავებულია ფერად გამოსახულებათა შემდგენების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის შესაბამისი ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის კომპრესიის ეგრეთ წოდებული ზონური მეთოდის ალგორითმი, რომელიც ითვალისწინებს ტრანსფორმანტას არამთავარი კოეფიციენტების მასივიების დაყოფას ზონებად და მინიზონებად და მათში შემავალი კოეფიციენტების კოდირებას ჰაფმანის ცვლადი სიგრძის კოდებით.

4. ნაჩვენებია, რომ ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის მხოლოდ ზონური კოდირების ალგორითმით კომპრესია ეფექტურია მცირე დეტალობით გამორჩეული

გამოსახულებების სამივე შემდგენისათვის (გამოსახულებები “თი-ბი-სი”, “მთები”, “ტექსტი”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა”) და ნაკლებად მცირე დეტალობით გამორჩეული გამოსახულებების ზოგიერთი შემდგენისათვის (“ბუნება”, “ნაგაზი”, “კატა”, “ციხესიმაგრე”, “ფერმა”, “დაისი”, “ზამთარი”, “გარნიტური”, “ტბა”, “შემოდგომა”, “კოშკი”, “კოლიზეუმი”, “მამადავითი”, “ფუნიკულიორი”).

5. გამოკვლეულია საცდელი გამოსახულებების შემდგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების სტატისტიკური მონაცემები, რომელთა გათვალისწინება ზონური მეთოდით გამოსახულებათა კოდირებისას იძლევა ზონებისა და მინიზონების და შესაბამისი საინფორმაციო სიმბოლოების რაოდენობების შემცირების შესაძლებლობას ნულოვანი არამთავარი კოეფიციენტებისაგან შედგენილი ტრანსფორმანტების გარკვეული რაოდენობის შემთხვევაში. კერძოდ, გამოსახულებების სიკაშკაშის შემდგენისათვის ასეთი ტრანსფორმანტების (სულ 1024 ტრანსფორმანტაა) რაოდენობა უნდა აღემატებოდეს 341-ს (გამოსახულებები “თი-ბი-სი”, “ციხესიმაგრე”, “ტბა”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა”), ფერსხვაობითი C_r შემდგენისათვის (სულ 256 ტრანსფორმანტა) – 128-ს (“ბუნება”, “ნაგაზი”, “თი-ბი-სი”, “კატა”, “ციხესიმაგრე”, “კენკრა”, “მთები”, “ტექსტი”, “ფონი”, “ღრუბელი”, “ფუნიკულორი” და “ტელეანძა”), ხოლო ფერსხვაობითი C_b – ასევე 128-ს (“თი-ბი-სი”, “კენკრა”, “მთები”, “ტბა”, “ტექსტი”, “ფონი”, “ღრუბელი” და “ტელეანძა”).

6. ნაჩვენებია, რომ ზონური კოდირების მეთოდის გამოყენებისას მისი ეფექტურობა შეიძლება ამაღლდეს, აგრეთვე, ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების სკანირებულ მიმდევრობაში არანულოვანი კოეფიციენტის მაქსიმალური კოორდინატის ნომრის გათვალისწინებითაც, რაც კონკრეტული გამოსახულებისათვის იძლევა ზონებისა და მინიზონების რაოდენობისა და, შესაბამისად, სიმბოლოების რაოდენობის შემცირების შესაძლებლობას.

7. შედგენილია ჰაფმანის მოდიფიცირებული ცხრილები, რომლებიც მისადაგებულია კონკრეტული საცდელი გამოსახულების შედმგენების შესაბამისი ტრანსფორმანტების სტატისტიკურ მონაცემებთან და რომელთა საშუალებითაც მრავალი გამოსახულებისათვის უმჯობესდება კომპრესიის ხარისხი.

8. შემუშავებულია ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ადაპტური სკანირების ალგორითმი, რომელიც იყენებს როგორც ზიგზაგ-ჰორიზონტალური (არსებული მეთოდი), ასევე ზიგზაგ-ვერტიკალური (შემოთავაზებული მეთოდი) სკანირებიდან ერთ-ერთს, რაც, თავის მხრივ, კიდევ უფრო ამაღლებს კომპრესიის ეფექტურობას.

9. ნაჩვენებია, რომ ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტური უდანაკარგო კოდირების დამუშავებული მეთოდის შეხამება მთავარი კოეფიციენტების მასივის ადაპტურ უდანაკარგო კოდირებასთან ყველა საცდელი გამოსახულებისათვის იძლევა კომპრესიის უკეთეს მაჩვენებლებს არსებულ მეთოდთან შედარებით. ამ მხრივ ყველაზე საუკეთესო შედეგით გამოირჩევა ძალზე მცირე დეტალობის მქონე გამოსახულება ”ფონი”, რომლისთვისაც კომპრესიის ფაქტორი იზრდება 74,007%-ით ($F_{არ}$=147,673 და $F_{ად}$=256,962), ხოლო ყველაზე დაბალი მაჩვენებლით – მაღალი დეტალობის მქონე გამოსახულება ”კენკრა”, რომლისთვისაც კომპრესიის ფაქტორი გაიზარდა 1,011%-ით ($F_{არ}$=13,967 და $F_{ად}$=14,121).

10. ფერად საცდელ გამოსახულებათა სამივე შემდგენისთვის შეფასებულია საინფორმაციო (ჭარბ) ბიტებზე ხელშეშლების ზემოქმედების შედეგები აღდგენილ გამოსახულებათა ხარისხობრივი მაჩვენებლების თვალსაზრისით და დადგენილია, რომ ხელშეშლა-მდგრადობის ამაღლების მიზნით შესაძლებელია საინფორმაციო სიმბოლოების რამდენჯერმე (მაგალითად, 3-ჯერ) გამეორება (გადაცემა). მაშინ სიმბოლოების სამი ერთნაირი კომბინაციიდან ერთის დამახინჯებისას დანარჩენი ორი არ იქნება დამახინჯებული და გამოსახულების აღდგენისას შესაძლებელია მათზე დაყრდნობა.

11. შეფასებულია სხვადასხვა კლასის (ძალზე მცირე, მცირე, საშუალო და მაღალი დეტალობის მქონე) საცდელი ფერადი გამოსა-ხულებების შემუშავებული მეთოდით კომპრესიის შედეგად მიღებული გამოსახულებების ხარისხობრივი პარამეტრები როგორც ობიექტური, ასევე სუბიექტური კრიტერიუმების საფუძველზე, რომლებიც ემთხვევა JPEG და MPEG სტანდარტებით განხორციელებული კომპრესიის შედეგად მიღებული გამოსახულებების შესაბამის პარამეტრებს.

ლიტერატურა

1. ISO/IEC DIS 10918-1. Information Technology – Digital Compression and Coding of Continuous-tone Still Images: Requirements and Guidelines./Ed/1, JTS 1/SC 9, 1994.
2. ISO/IEC JTC/SC29/WG11. Coding of Moving Pictures and Audio. MPEG-4. Overview. 1999.
3. ISO/IEC 11172-1. Information Technology – Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storige Media up to about 1.5 Mbits/s. Part 1: Systems./Ed/1, JTS 1/SC 29, 1993.
4. ISO/IEC 11172-1. Information Technology – Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storige Media up to about 1.5 Mbits/s. Part 2: Systems./Ed/1, JTS 1/SC 29, 1993.
5. Schafer R. DVB bei den offentlich-rechtlichen Rundfunkanstallen // FKT: Fernseh-und-Kino-technik. – 1997. – 51, N10, 620-630.
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/dvb, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული – 20.10.2014
7. http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/History_Study_Reports, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული – 20.10.2014
8. http://transparency.ge/post/report/tsipruli-mitsiszeda-satelevizio-mautsqeblobis-danergva-sakartveloshi-nabiji-tsin, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული – 20.10.2014
9. Feig E.N., Linzer E. Discrete Cosine Transform Algoritms for Image Data Compression// Proceedings Electronic Imaging ’90 East. – Boston, MA, 1990. – pp. 84-10. 13. Цифровое кодирование телевизионных изображений / Под ред. И. И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.
10. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений. Книга 1 и 2. –ММ.: МИР, 1982. – 790 с.
11. Кунт М., Икономополос М. Кошер. Методы кодирования изображений второго поколения// ТИИЭР, 1985, т. 73, № 4, с. 9-87.
12. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов. – М.: Связь, 1980. – 248 с.
13. Кретц Ф., Насс Д. Цифровое телевидение. Методы передачи и кодирования// ТИИЭР, 1985, т. 73, № 4, с. 87-107.
14. Хунцария Дж. М., Хирьянов Ю. А., Хунцария Л.Дж. Компрессия изображений на примере стандарта JPEG. – Тбилиси, GESJ: Computer Science and Telecommunications, N4 (27) , 2010, с. 76-85.
15. Смирнов А. В. Основы цифрового телевидения: Учебное пособие. – М.: “Горячая линия–Телеком”, 2001. –224 с.

16. Харатишвили Н. Г., Чхеидзе И. М., Ронсен Д., Инджия Ф. И. Пирамидальное кодирование изображений. – М.: Радио и связь, 1996.–192 с.
17. Gu C., Kunt M. Contour image sequence coding by motion compensation and morphological filtering . Annual Report R 2053/ UPC/GPC/AR/R/002/b1-1993 of the Morpheco project. – August 1993. – pp. 12-15.
18. Зубарев Ю. Б., Дворкович В. П. и др. Мультимедия-проблемы и перспективы внедрения. Цифровая обработка телевизионных и компютерных сигналов. – М.: 2001, № 1, с. 2-12.
19. Сэломон Д. Сжатие данных, изображений и звука. –М.: Техносфера, 2004.–368 с.
20. Witten I.H., Neal R. M., Cleary J. G. Arithmetic Coding for Data Compression. Communications of the ACM, N30(6), 1987, pp.520-540.
21. Vitter J. S. Design and Analysis of Dynamic Huffman Codes. Journal of the ACM, N34(4), 1987, pp. 825-845.
22. https://en.wikipedia.org/wiki/Information_theory, უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული – 20.10.2014
23. Понсен Дж. Использование преобразования Адамара для кодирования и сжатия сигналов изображения. – Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 3, с. 30-56.
24. Хунцария Дж. М., Чхеидзе И. М. Об одном гибридном способе кодирования изображений // Всесоюзный симпозиум “Проблемы цифрового кодирования и преобразования изображений”. – Тбилиси, 1980. –с. 13-14.
25. Мусман Х. Г., Пирш П., Гралерт Х.-Й. Достижения в области кодирования изображений. – ТИИЭР, 1985, т. 73, № 4, с. 87-107.
26. Хмурны Я. А., Мигалик Я. Я. Гибридное кодирование изображения с применением преобразования Уолша-Адамара и дифференциальной импульсно-кодовой модуляции. Известия высших учубных заведений, т. 28, №5, Радиоэлектроника, 1985, с. 61-63.
27. Кретц Ф., Насс Д. Цифровое телевидение. Методы передачи и кодирования// ТИИЭР, 1985, т. 73, № 4, с. 87-107.
28. Kharatishvili N. G., Zumburidze O.G., Gurgenidze Z.A. Image vector quantization// Sig. Proc/ International Conference. – Riga. April, 1990. – pp. 24-26.
29. Ding Chengjun, Zumburidze o. g. Fast algoritms in TV image vector quantization// International Conference on Communication Technology// Beijing, China, 1992.
30. Смирнов А. В. Основы цифрового телевидения: Учебное пособие. – М.: “Горячая линия–Телеком”, 2001. –224 с.
31. Ding Chengjun, Zumburidze o. g. Fast algoritms in TV image vector quantization// International Conference on Communication Technology// Beijing, China, 1992.

32. Kharatishvili N. G., Ronsin J., Chkheidze I. M., Diynova V. G., Abzianidze N. E. Orthogonal and Non orthogonal Methods of the Pyramid Coding of TV Signals in Satellite Communication// Russian CIS and East European Authors ISFOC-93, St. Petersburg, Russia, 1993. –pp. 20-28.

33. Цифровое кодирование телевизионных изображений / Под ред. И. И. Цуккермана. – М.: Радио и связь, 1981. – 240 с.

34. Цифровое телевидение/ Под ред. М. И. Кривошеева.– .: Связь, 1980.–263 с.

35. Уинтц П. Кодирование изображение посредством преобразований // ТИИЭР, 1972, т. 60, с. 69-83.

36. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и техника / Пер. с Чешск. Под ред. Л. С. Виленчика. – М.: Радио и связь, 1990. – 528 с.

37. Feig E.N., Linzer E. Discrete Cosine Transform Algoritms for Image Data Compression// Proceedings Electronic Imaging ’90 East. – Boston, MA, 1990. – pp. 84-87.

38. Нетравали А. Н., Лимб Дж. О. Кодирование изображений: Обзор. – ТИИЭР, 1980, т. 68, № 3, с. 76-124.

39. Хунцария Дж. М., Абуладзе В. Ш., Джохадзе Т.Г. Быстрое Х-преобразование / Сборник научных трудов по материалам второй Международной научно-технической конференции “Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях”. Алматы, 2000, с. 205-207.

40. ვ. აბულაძე. უოლშის გარდასახვა და მისი ნაირსახეობა / სტუ-ს სამეცნიერო შრომების კრებული № 4(428), თბილისი, 1999, გვ. 106-110.

41. Прэтт У. К. Цифровая обработка изображений. Книга 1 и 2. –ММ.: МИР, 1982. – 790 с.

42. Хуанг Т., Шрейбер В., Третьяк О. Обработка изображений. – ТИИЭР, 1971, т. 59, № 11, с. 59-89.

43. Ен К. Функции Уолша и код Грея. – Зарубежная радиоэлектроника, 1972, № 7, с. 27-35.

44. Хунцария Дж. М., Абуладзе В. Ш. Эффективное кодирование изображений с учетом структурных свойств коэффициентов преобразования Уолша. Сборник научных трудов по материалам первой Международной конференции "Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях". Часть 5. Радиоэлектроника, телекоммуникации и информационные технологии. – Алма-Ата, 1998.

45. ლ. ხუნწარია, ვ. აბულაძე, ჯ. ხუნწარია. უოლშის გარდასახვის მასივში სიმბოლოთა განლაგების თავისებურებანი/ მეცნიერება და ტექნოლოგიები № 4-6, თბილისი, 2005. – გვ. 62–66.

46. ხუნწარია ჯ. მ., გოგბერაშვილი მ. რ., ჯღამაძე მ. ს., მაჩალაძე რ. ი. უდანაკარგოდ კოდირებული წრფივი გარდასახვის ტრანსფორმანტების დეკოდირების ალგორითმი. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის "ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები" მოხსენებების კრებული. ქუთაისი, 2010, გვ. 281-284.

47. ხუნწარია ჯ. მ., გოგბერაშვილი მ. რ., ჯღამაძე მ. ს., მაჩალაძე რ. ი. დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების ეკონომიური კოდირების მეთოდი. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის "ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები" მოხსენებების კრებული. ქუთაისი, 2010, გვ. 285-291.

48. ხუნწარია ჯ. მ., ხირიანოვი ი. ა., გოგბერაშვილი მ. რ., ჯღამაძე მ. ს. დაკვანტვის მატრიცის შერჩევა გამოსახულებათა სიგნალების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტები-სათვის. საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის "ახალი ტექნოლოგიები თანამედროვე მრეწველობაში" შრომები. თბილისი, 2010, გვ. 190-194.

49. ჯ. ხუნწარია, მ. გოგბერაშვილი, რ. მაჩალაძე, მ. ჯღამაძე. გამოსახულებათა დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის მთავარი კოეფიციენტების მასივის კორელაციური თავისებურებანი. – საერთაშორისო საინჟინრო აკადემიისა და საქართველოს საინჟინრო აკადემიის ჟურნალი "Georgian Engineering News" (GEN), №3, თბილისი, 2011, გვ. 21-26.

50. ხუნწარია ჯ. მ., ჯღამაძე მ. ს., გოგბერაშვილი მ. რ., მაჩალაძე რ. ი. დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების სტატისტიკური მახასიათებლები. – საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის ყოველთვიური სამეცნიერო-რეფერირებული ჟურნალი "მეცნიერება და ტექნოლოგიები" №10-12, თბილისი, 2011, გვ. 26-34

51. ხუნწარია ჯ. მ., ჯღამაძე მ. ს. გამოსახულებათა ტრანსფორმანტების ზონური კოდირება ტრანსფორმანტების სტატისტიკური პარამეტრების ანალიზის საფუძველზე. – საერთაშორისო საინჟინრო აკადემიისა და საქართველოს საინჟინრო აკადემიის ჟურნალი "Georgian Engineering News" (GEN), №2, თბილისი, 2012, გვ. 48-62.

52. ჯღამაძე მ. ს. მონაცემთა ენტროპიული კოდირება ჰაფმანის კოდების გამოყენებით. – საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჟურნალი "განათლება" №1(4), თბილისი 2012. გვ. 275-282

53. გოგბერაშვილი მ. მონაცემთა ორგანზომილებიანი მასივის სკანირების ვარიანტები. – თბილისი, სტუ, "განათლება" №1 (4), 2012, გვ. 240-244.

54. Zprava CCIR XI/c. 405-4: Subjective Assesment of the Quality of Television Pictures. – Geneva, 1982.

დანართი 1. დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების მასივის ზონური კოდირების პროგრამა

ჩაწერეთ გამოსახულების სახელი -- name:= "lena_color.bmp"

Skanirebis_varianti– –zigzag – horizontalur skan := 1

გამოსახულების სიკაშკაშის Y შემდგენის ტრანსფორმანტების კოეფიციენტების 256x256 ზომის მასივი

FY =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	79	1	0	0	0	0	0	0	77	1
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	79	-1	0	0	0	0	0	0	79	-1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

ტრანსფორმანტების მთავარი კოეფიციენტების ჰორიზონტალური მიმართულებით ფორმირებული სხვაობზებისა და არამთავარი კოეფიციენტების მასივი

XY2 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	79	1	0	0	0	0	0	0	2	1
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2
9	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

მთავარი კოეფიციენტების სხვაობითი მნიშვნელობების კოდირება ჰაფმანის კოდით

უარყოფითი მნიშვნელობების გადადებითება

$$
\mathbf{DXY1024} := \left|\begin{array}{l}
\mathbf{for}\ \ k \in 0..1023 \\
\quad \mathbf{for}\ \ l \in 0..63 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow \mathrm{round}\left[XY1024_{k,l}\cdot(-1)\right] \ \ \mathbf{if}\ \ XY1024_{k,l} < 0 \\
A_{k,l} \leftarrow \mathrm{round}\left(XY1024_{k,l}\right) \ \ \mathbf{otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
\mathbf{ZY} := \left|\begin{array}{l}
\mathbf{for}\ \ k \in 0..1023 \\
\quad \mathbf{for}\ \ l \in 0..63 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow \mathrm{round}\left(DXY1024_{k,l}\right) \ \ \mathbf{if}\ \ l \neq 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 127 \ \ \mathbf{if}\ \ l = 0
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

მთავარი კოეფიციენტების სხვაობითი მნიშვნელობების აბსოლუტური სიდიდეების მასივი

$$
\mathbf{FYM} := \left|\begin{array}{l}
\mathbf{for}\ \ k \in 0..1023 \\
\quad \mathbf{for}\ \ l \in 0 \\
\quad\quad A_{l,k} \leftarrow \mathrm{round}\left(DXY1024_{k,l}\right) \\
A
\end{array}\right.
$$

მისი კოდირება ჰაფმანის კოდით

$$
\mathbf{RYM} := \left|\begin{array}{l}
\mathbf{for}\ \ k \in 0 \\
\quad \mathbf{for}\ \ l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 1 \ \ \mathbf{if}\ \ FYM_{k,l} = 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 3 \ \ \mathbf{if}\ \ FYM_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 5 \ \ \mathbf{if}\ \ 2 \le FYM_{k,l} \le 3 \\
A_{k,l} \leftarrow 7 \ \ \mathbf{if}\ \ 4 \le FYM_{k,l} \le 7 \\
A_{k,l} \leftarrow 9 \ \ \mathbf{if}\ \ 8 \le FYM_{k,l} \le 15 \\
A_{k,l} \leftarrow 11 \ \ \mathbf{if}\ \ 16 \le FYM_{k,l} \le 31 \\
A_{k,l} \leftarrow 13 \ \ \mathbf{if}\ \ 32 \le FYM_{k,l} \le 63 \\
A_{k,l} \leftarrow 15 \ \ \mathbf{if}\ \ 64 \le FYM_{k,l} \le 127 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \ \mathbf{otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

RYM=

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	15	5	7	9	11	7	5	7	5	...

$$
\mathbf{NYM} := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} RYM_{k,l} \qquad \mathbf{NYM} = 7726
$$ ბიტი

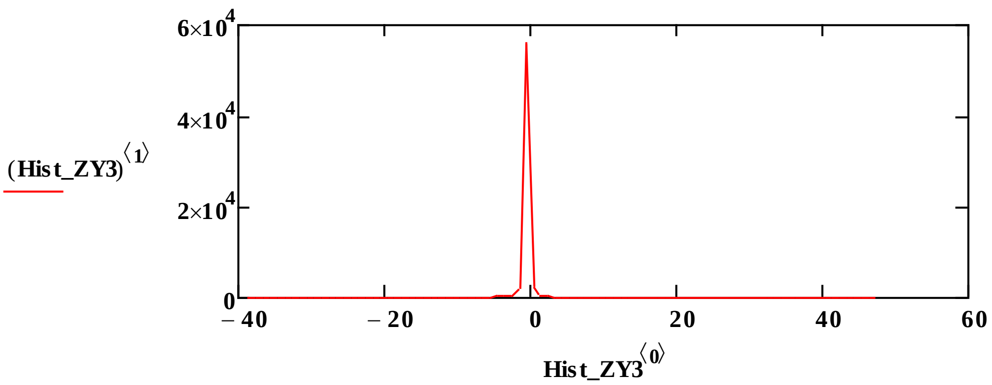
ტრანსფორმანტების არამთავარი კოეფიციენტების ზიგზაგ-ჰორიზონტალური სკანირების შედეგად ფორმირებული 1024x63 ზომის მასივი

$$ZY3 := \left| \begin{array}{l} \textbf{for}\ \ k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for}\ \ l \in 1..63 \\ \quad\quad A_{k,l-1} \leftarrow \mathrm{round}\left(XY1024_{k,l}\right) \\ A \end{array} \right.$$

ZY3 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-4	0	0	-1	-1	0	0	1	0	0
3	15	2	0	0	-4	1	0	0	0	0
4	-3	1	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0
6	-3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
7	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Hist\_ZY3 := HMPAR(ZY3)$



$ENTR\_MPAR(Hist\_ZY3) = 1.012$

$\max(ZY3) = 48$

$\min(ZY3) = -39$

ზონური + ჰაფმანი

არამთავარი არანულოვანი კოეფიციენტების კოდირება ჰაფმანის კოდით

$$XYA1024 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow \text{round}\left(DXY1024_{k,l}\right) \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{if } l = 0 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$SXYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{k=k}^{k} \sum_{l=0}^{63} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNXYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SXYA_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

SNXYA =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	1	7	22	6	3	5	2	2	...

$$SSNXYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } SNXYA_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

SSNXYA =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$$NNXYA := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} SSNXYA_{k,l}$$

$NNXYA = 26$

არამთავარი კოეფიციენტების ნულოვანი ფრაგმენტების რაოდენობა

მთლიანი გამოსახულების სტატისტიკის გათვალისწინება.
საჭირო დამატებითი ბიტების რაოდენობა

$NY???? := 6$ გამოსახულების მაქსიმალური მნიშვნელობის კოეფიციენტების MKY მასივში ბოლო არანულოვანი კოეფიციენტის კოორდინატის დაფიქსირებისათვის – 6 ბიტი (სულ 64 კოეფიციენტია)

დანართი 1 (გაგრძელება)

$$MKYLen := \begin{pmatrix} 79 & 48 & 35 & 11 & 5 & 2 & 2 & 1 \\ 31 & 29 & 15 & 8 & 4 & 2 & 1 & 1 \\ 16 & 15 & 13 & 6 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 6 & 6 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad MKYBei := \begin{pmatrix} 109 & 49 & 33 & 12 & 4 & 3 & 3 & 1 \\ 35 & 26 & 11 & 7 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 16 & 14 & 10 & 4 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 9 & 10 & 5 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

```
KK1 := | A ← MKYLen  if  name= "lena_color.bmp"
       | A ← MKYBei  if  name= "Beions.bmp"
       | A ← MKYPrir  if  name= "Priroda.bmp"
       | A ← MKYDog  if  name= "DOG.bmp"
       | A ← MKYTBC  if  name= "TBC.bmp"
       | A ← MKYCat  if  name= "cat.bmp"
       | A ← MKYFort  if  name= "fort.bmp"
       | A ← MKYTree  if  name= "tree.bmp"
       | A ← MKYCher  if  name= "cherry.bmp"
       | A ← MKYCros  if  name= "cross.bmp"
       | A ← MKYKid  if  name= "kid.bmp"
       | A ← MKYPark  if  name= "park.bmp"
       | A ← MKYBer  if  name= "BERRIES.BMP"
       | A ← MKYSun  if  name= "Sunset.bmp"
       | A ← MKYWin  if  name= "Winter.bmp"
       | A ← MKYPic  if  name= "Picture 001.bmp"
       | A ← MKYWat  if  name= "Water lilies.bmp"
       | A ← MKYBlue  if  name= "Blue hills.jpg"
       | A ← MKYLake  if  name= "Lake.jpg"
       | A ← MKYShop  if  name= "Shop.jpg"
       | A ← MKYPlay  if  name= "Play Ground.jpg"
       | A ← MKYAut  if  name= "AutumnView.jpg"
       | A ← MKYTow  if  name= "Tower.jpg"
       | A ← MKYHist  if  name= "History.jpg" ∧ a = 1
       | A ← MKYDan  if  name= "DanChin.jpg"
       | A ← MKYFon  if  name= "History.jpg" ∧ a = 2
       | A ← MKYGrub  if  name= "Tower.jpg" ∧ a = 2
```

$$
KK2 := \begin{array}{|l}
A \leftarrow MKYLen^{T} \ \text{if} \ name = \text{"lena\_color.bmp"} \\
A \leftarrow MKYBei^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Beions.bmp"} \\
A \leftarrow MKYPrir^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Priroda.bmp"} \\
A \leftarrow MKYDog^{T} \ \text{if} \ name = \text{"DOG.bmp"} \\
A \leftarrow MKYTBC^{T} \ \text{if} \ name = \text{"TBC.bmp"} \\
A \leftarrow MKYCat^{T} \ \text{if} \ name = \text{"cat.bmp"} \\
A \leftarrow MKYFort^{T} \ \text{if} \ name = \text{"fort.bmp"} \\
A \leftarrow MKYTree^{T} \ \text{if} \ name = \text{"tree.bmp"} \\
A \leftarrow MKYCher^{T} \ \text{if} \ name = \text{"cherry.bmp"} \\
A \leftarrow MKYCros^{T} \ \text{if} \ name = \text{"cross.bmp"} \\
A \leftarrow MKYKid^{T} \ \text{if} \ name = \text{"kid.bmp"} \\
A \leftarrow MKYPark^{T} \ \text{if} \ name = \text{"park.bmp"} \\
A \leftarrow MKYBer^{T} \ \text{if} \ name = \text{"BERRIES.BMP"} \\
A \leftarrow MKYSun^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Sunset.bmp"} \\
A \leftarrow MKYWin^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Winter.bmp"} \\
A \leftarrow MKYPic^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Picture 001.bmp"} \\
A \leftarrow MKYWat^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Water lilies.bmp"} \\
A \leftarrow MKYBlue^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Blue hills.jpg"} \\
A \leftarrow MKYLake^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Lake.jpg"} \\
A \leftarrow MKYShop^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Shop.jpg"} \\
A \leftarrow MKYPlay^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Play Ground.jpg"} \\
A \leftarrow MKYAut^{T} \ \text{if} \ name = \text{"AutumnView.jpg"} \\
A \leftarrow MKYTow^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Tower.jpg"} \\
A \leftarrow MKYHist^{T} \ \text{if} \ name = \text{"History.jpg"} \wedge a = 1 \\
A \leftarrow MKYDan^{T} \ \text{if} \ name = \text{"DanChin.jpg"} \\
A \leftarrow MKYFon^{T} \ \text{if} \ name = \text{"History.jpg"} \wedge a = 2 \\
A \leftarrow MKYGrub^{T} \ \text{if} \ name = \text{"Tower.jpg"} \wedge a = 2
\end{array}
$$

$$
KK := \begin{array}{|l}
KK1 \ \text{if} \ skan = 1 \\
KK2 \ \text{if} \ skan = 2
\end{array}
$$

$$
KK = \begin{pmatrix}
79 & 48 & 35 & 11 & 5 & 2 & 2 & 1 \\
31 & 29 & 15 & 8 & 4 & 2 & 1 & 1 \\
16 & 15 & 13 & 6 & 3 & 1 & 1 & 1 \\
7 & 6 & 6 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 \\
7 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\
3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{pmatrix}
$$

KKskan =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	48	31	16	29	35	11	15	15	7	...

$$MNA_{0,0} := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A \leftarrow \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{62} KKskan_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$MNA_{0,1} := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A \leftarrow \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=1}^{62} KKskan_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$MNA_{0,0} = 306$ $\qquad$ $MNA_{0,1} = 258$

$$MNA_{0,2} := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A \leftarrow \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=2}^{62} KKskan_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

...

$$MNA_{0,62} := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A \leftarrow \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=62}^{62} KKskan_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$MNA_{0,2} = 227$ $\qquad$ $MNA_{0,62} = 0$

$$NAD := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } MNA_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

NAD =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$$NADA := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{62} NAD_{k,l} \qquad NADA = 10 \qquad NA := 63 - NADA \qquad NA = 53$$

$$NNYz := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{if } NA = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } 1 \le NA \le 2 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } 2 < NA \le 5 \wedge SSNXYA_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \quad \text{if } 2 < NA \le 5 \wedge SSNXYA_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } 5 < NA \le 14 \wedge 342 < NNXYA \ge 513 \wedge SSNXYA_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \quad \text{if } 5 < NA \le 14 \wedge 342 < NNXYA \ge 513 \wedge SSNXYA_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \quad \text{if } 5 < NA \le 14 \wedge 342 < NNXYA < 513 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } NA > 14 \wedge NNXYA \ge 342 \wedge SSNXYA_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \quad \text{if } NA > 14 \wedge NNXYA \ge 342 \wedge SSNXYA_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \quad \text{if } NA > 14 \wedge NNXYA < 342 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

NNYz =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	...

$$NYz := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NNYz_{k,l}$$

$NYz = 3072$ ბიტი

მერვე ზონაა ნულოვანი ფრაგმენტი, თუ ასეთი ფრაგმენტების რაოდენობა $NNXYA \geq 342$

$$SSNZ1Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{2} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ2Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{5} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ1Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ1Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ2Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ2Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ3Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{9} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ4Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{14} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ3Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ3Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ4Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ4Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

ზონა 5

ზონა 6

$$SSNZ5Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{20} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ6Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{27} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ5Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ5Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ6Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ6Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

დანართი 1 (გაგრძელება)

ზონა 7

$$SSNZ7Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{63} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

ზონა 77

$$SSNZ77Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{35} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ7Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ7Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ77Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ77Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

ზონა 8

$$SSNZ8Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=1}^{63} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ8Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ8Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z7Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ7Y_{k,l} = SNZ6Y_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ7Y_{k,l} > SNZ6Y_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z8Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ8Y_{k,l} = SNZ77Y_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ7Y_{k,l} > SNZ77Y_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z77Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ77Y_{k,l} = SNZ6Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ77Y_{k,l} > SNZ6Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z6Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ6Y_{k,l} = SNZ5Y_{k,l} \wedge Z7Y_{k,l} > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ6Y_{k,l} > SNZ5Y_{k,l} \wedge Z7Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z5Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \begin{cases} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ5Y_{k,l} = SNZ4Y_{k,l} \wedge \left(Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ5Y_{k,l} > SNZ4Y_{k,l} \wedge \left(Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z4Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \begin{cases} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ4Y_{k,l} = SNZ3Y_{k,l} \wedge \left(Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ4Y_{k,l} > SNZ3Y_{k,l} \wedge \left(Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z3Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \begin{cases} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } \left(SNZ3Y_{k,l} = SNZ2Y_{k,l}\right) \wedge \left(Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } \left(SNZ3Y_{k,l} > SNZ2Y_{k,l}\right) \wedge \left(Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z2Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \begin{cases} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ2Y_{k,l} = SNZ1Y_{k,l} \wedge \left(Z3Y_{k,l} + Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ2Y_{k,l} > SNZ1Y_{k,l} \wedge \left(Z3Y_{k,l} + Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z1Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \begin{cases} A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ if } SNZ1Y_{k,l} = 0 \wedge \left(Z2Y_{k,l} + Z3Y_{k,l} + Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } SNZ1Y_{k,l} > 0 \wedge \left(Z2Y_{k,l} + Z3Y_{k,l} + Z4Y_{k,l} + Z5Y_{k,l} + Z6Y_{k,l} + Z7Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

$$NZYA1 := \sum_{i=0}^{0} \sum_{j=0}^{1023} ZYA1_{i,j}$$

$$ZYA1 := Z1Y + Z2Y + Z3Y + Z4Y + Z5Y + Z6Y + Z7Y$$

$NZYA1 = 998$ არამთავარი კოეფიციენტების არანულოვანი ფრაგმენტების რაოდენობა

$NZY1 := 1024 - NZYA1$

$NZY1 = 26$ არამთავარი კოეფიციენტების ნულოვანი ფრაგმენტების რაოდენობა

$$\mathbf{ZYA2} := \mathbf{Z1Y} + \mathbf{Z2Y} + \mathbf{Z3Y} + \mathbf{Z4Y} + \mathbf{Z5Y} + \mathbf{Z6Y} + \mathbf{Z77Y} + \mathbf{Z8Y}$$

$$\mathbf{NZYA2} := \sum_{i=0}^{0} \sum_{j=0}^{1023} \mathbf{ZYA2}_{i,j}$$

$\mathbf{NZYA2} = \mathbf{998}$ არამთავარი კოეფიციენტების არანულოვანი ფრაგმენტების რაოდენობა

$\mathbf{NZY2} := \mathbf{1024} - \mathbf{NZYA2}$

$\mathbf{NZY2} = \mathbf{26}$ არამთავარი კოეფიციენტების ნულოვანი ფრაგმენტების რაოდენობა

მე–2 ზონის მინიზონები

მინიზონა 21

$$\mathbf{SSNZ21Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \displaystyle\sum_{l=3}^{4} \mathbf{XYA1024}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

მინიზონა 22

$$\mathbf{SSNZ22Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \displaystyle\sum_{l=3}^{5} \mathbf{XYA1024}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

$$\mathbf{SNZ21Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow \mathbf{SSNZ21Y}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

$$\mathbf{SNZ22Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow \mathbf{SSNZ22Y}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

$$\mathbf{Z22Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \qquad \left|\begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{if } \left(\mathbf{SNZ22Y}_{k,l} = \mathbf{SNZ21Y}_{k,l}\right) \wedge \mathbf{Z2Y}_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } \left(\mathbf{SNZ22Y}_{k,l} > \mathbf{SNZ21Y}_{k,l}\right) \wedge \mathbf{Z2Y}_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array}\right. \\ A \end{array}\right.$$

$$\mathbf{Z21Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \qquad \left|\begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{if } \left(\mathbf{SNZ22Y}_{k,l} > \mathbf{SNZ21Y}_{k,l}\right) \wedge \mathbf{Z2Y}_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \quad \text{if } \left(\mathbf{SNZ22Y}_{k,l} = \mathbf{SNZ21Y}_{k,l}\right) \wedge \mathbf{Z2Y}_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array}\right. \\ A \end{array}\right.$$

მე–3 ზონის მინიზონები

მინიზონა 31

$$\mathbf{SSNZ31Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \displaystyle\sum_{l=6}^{7} \mathbf{XYA1024}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

მინიზონა 32

$$\mathbf{SSNZ32Y} := \left|\begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \displaystyle\sum_{l=6}^{9} \mathbf{XYA1024}_{k,l} \\ A \end{array}\right.$$

$$SNZ31Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ31Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ32Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ32Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z32Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \left(SNZ32Y_{k,l} = SNZ31Y_{k,l}\right) \wedge Z3Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ32Y_{k,l} > SNZ31Y_{k,l}\right) \wedge Z3Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z31Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \left(SNZ32Y_{k,l} > SNZ31Y_{k,l}\right) \wedge Z3Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ32Y_{k,l} = SNZ31Y_{k,l}\right) \wedge Z3Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

მე–4 ზონის მინიზონები

მინიზონა 41

$$SSNZ41Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=10}^{11} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 42

$$SSNZ42Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=10}^{14} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ41Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ41Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ42Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ42Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z42Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \left(SNZ42Y_{k,l} = SNZ41Y_{k,l}\right) \wedge Z4Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ42Y_{k,l} > SNZ41Y_{k,l}\right) \wedge Z4Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$
Z41Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{if } \left(SNZ42Y_{k,l} > SNZ41Y_{k,l}\right) \wedge Z4Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \;\; \text{if } \left(SNZ42Y_{k,l} = SNZ41Y_{k,l}\right) \wedge Z4Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

მე–5 ზონის მინიზონები

მინიზონა 51

$$
SSNZ51Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=15}^{18} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

მინიზონა 52

$$
SSNZ52Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=15}^{20} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
SNZ51Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0 \\
\quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ51Y_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
SNZ52Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0 \\
\quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ52Y_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
Z52Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{if } \left(SNZ52Y_{k,l} = SNZ51Y_{k,l}\right) \wedge Z5Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \;\; \text{if } \left(SNZ52Y_{k,l} > SNZ51Y_{k,l}\right) \wedge Z5Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
Z51Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{if } \left(SNZ52Y_{k,l} > SNZ51Y_{k,l}\right) \wedge Z5Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \;\; \text{if } \left(SNZ52Y_{k,l} = SNZ51Y_{k,l}\right) \wedge Z5Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \;\; \text{otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

მე–6 ზონის მინიზონები

მინიზონა 61

$$
SSNZ61Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=21}^{24} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

მინიზონა 62

$$
SSNZ62Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=21}^{27} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$SNZ61Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ61Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ62Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ62Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z62Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \ \textbf{if } \left(SNZ62Y_{k,l} = SNZ61Y_{k,l}\right) \wedge Z6Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \ \textbf{if } \left(SNZ62Y_{k,l} > SNZ61Y_{k,l}\right) \wedge Z6Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \ \textbf{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z61Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \ \textbf{if } \left(SNZ62Y_{k,l} > SNZ61Y_{k,l}\right) \wedge Z6Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \ \textbf{if } \left(SNZ62Y_{k,l} = SNZ61Y_{k,l}\right) \wedge Z6Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \ \textbf{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

მე–7 ზონის მინიზონები

მინიზონა 71

$$SSNZ71Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{30} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 72

$$SSNZ72Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{35} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ71Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ71Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ72Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ72Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 73

$$SSNZ73Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{42} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 74

$$SSNZ74Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{63} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ73Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ73Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ74Y := \left| \begin{array}{l} \textbf{for } k \in 0..1023 \\ \quad \textbf{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ74Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 771

$$SSNZ771Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{30} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ771Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ771Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

მინიზონა 772

$$SSNZ772Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=28}^{35} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ772Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ772Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z74Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \left(SNZ74Y_{k,l} = SNZ73Y_{k,l}\right) \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ74Y_{k,l} > SNZ73Y_{k,l}\right) \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z73Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } SNZ73Y_{k,l} = SNZ72Y_{k,l} \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \wedge Z74Y_{k,l} > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ73Y_{k,l} > SNZ72Y_{k,l}\right) \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \wedge Z74Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z72Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } SNZ72Y_{k,l} = SNZ71Y_{k,l} \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z73Y_{k,l} + Z74Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ72Y_{k,l} > SNZ71Y_{k,l}\right) \wedge Z7Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z73Y_{k,l} + Z74Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z71Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \left(SNZ71Y_{k,l} = 0 \wedge Z7Y_{k,l} = 1\right) \wedge \left(Z72Y_{k,l} + Z73Y_{k,l} + Z74Y_{k,l} > 0\right) \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \left(SNZ71Y_{k,l} > 0 \wedge Z7Y_{k,l} = 1\right) \wedge \left(Z72Y_{k,l} + Z73Y_{k,l} + Z74Y_{k,l} = 0\right) \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$
Z772Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ772Y_{k,l} = SNZ771Y_{k,l} \wedge Z77Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ772Y_{k,l} > SNZ771Y_{k,l} \wedge Z77Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
Z771Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ771Y_{k,l} = 0 \wedge Z77Y_{k,l} = 1 \wedge Z772Y_{k,l} > 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ771Y_{k,l} > 0 \wedge Z77Y_{k,l} = 1 \wedge Z772Y_{k,l} = 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

მე–8 ზონის მინიზონები

მინიზონა 81

$$
SSNZ81Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{42} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

მინიზონა 82

$$
SSNZ82Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0..63 \\
\quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{63} XYA1024_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
SNZ81Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0 \\
\quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ81Y_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
SNZ82Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0..1023 \\
\quad \text{for } l \in 0 \\
\quad\quad A_{l,k} \leftarrow SSNZ82Y_{k,l} \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
Z82Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ82Y_{k,l} = SNZ81Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ82Y_{k,l} > SNZ81Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

$$
Z81Y := \left|\begin{array}{l}
\text{for } k \in 0 \\
\quad \text{for } l \in 0..1023 \\
\quad\quad \left|\begin{array}{l}
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ81Y_{k,l} = 0 \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge Z82Y_{k,l} > 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ81Y_{k,l} > 0 \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge Z82Y_{k,l} = 0 \\
A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise}
\end{array}\right. \\
A
\end{array}\right.
$$

$$SSNZ881Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{42} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ882Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{46} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ881Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ881Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ882Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ882Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ883Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{54} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SSNZ884Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..63 \\ \qquad A_{k,l} \leftarrow \sum_{l=36}^{63} XYA1024_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ883Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ883Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNZ884Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \qquad A_{l,k} \leftarrow SSNZ884Y_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$Z884Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \qquad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ884Y_{k,l} = SNZ883Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ884Y_{k,l} > SNZ883Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z883Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \qquad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ883Y_{k,l} = SNZ882Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge Z884Y_{k,l} > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ883Y_{k,l} > SNZ882Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge Z884Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z882Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \qquad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ882Y_{k,l} = SNZ881Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z883Y_{k,l} + Z884Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ882Y_{k,l} > SNZ881Y_{k,l} \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z883Y_{k,l} + Z884Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Z881Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ SNZ881Y_{k,l} = 0 \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z882Y_{k,l} + Z883Y_{k,l} + Z884Y_{k,l}\right) > 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ SNZ881Y_{k,l} > 0 \wedge Z8Y_{k,l} = 1 \wedge \left(Z882Y_{k,l} + Z883Y_{k,l} + Z884Y_{k,l}\right) = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz2Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z2Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z2Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz3Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z3Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z3Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz4Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z4Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z4Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz5Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z5Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z5Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz6Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z6Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z6Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz7Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \ \text{ if } \ Z7Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z7Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz77Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z77Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z7Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz8Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ Z8Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z8Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Nz88Y := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \ \text{ if } \ Z8Y_{k,l} \neq 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ Z8Y_{k,l} = 0 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$Nz2Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	...

$Nz3Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	...

$Nz4Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz5Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz6Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz7Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz77Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz8Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$Nz88Y =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$NYz2 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz2Y_{k,l}$ $NYz2 = 110$ biti $NYz3 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz3Y_{k,l}$ $NYz3 = 157$ biti

$NYz4 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz4Y_{k,l}$ $NYz4 = 185$ biti $NYz5 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz5Y_{k,l}$ $NYz5 = 158$ biti

$NYz6 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz6Y_{k,l}$ $NYz6 = 128$ biti $NYz7 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz7Y_{k,l}$ $NYz7 = 262$ biti

$NYz77 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz77Y_{k,l}$ $NYz77 = 81$ biti $NYz88 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz88Y_{k,l}$ $NYz88 = 100$ biti

$NYz8 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} Nz8Y_{k,l}$ $NYz8 = 50$ biti

მინიზონების დაფიქსირებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა

$NmzY1 := Nz2Y + Nz3Y + Nz4Y + Nz5Y + Nz6Y + Nz7Y$

$NmzY1 =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

$NmzY2 := Nz2Y + Nz3Y + Nz4Y + Nz5Y + Nz6Y + Nz77Y + Nz8Y$

$NmzY2 =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

$NmzY3 := Nz2Y + Nz3Y + Nz4Y + Nz5Y + Nz6Y + Nz77Y + Nz88Y$

$NmzY3 =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

$$NNmzY1 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NmzY1_{k,l} \qquad NNmzY2 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NmzY2_{k,l}$$

$NNmzY1 = 1000$ $\quad NNmzY2 = 869$ $\quad NNmzY3 = 919$

2 მინიზონა. წინა შემთხვევის იდენტურია

4 მინიზონა. პროგრამის ეს ნაწილი იმუშავებს მაშინ, როდესაც $NNXYA \geq 342$

$$NYmnz11 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow NmzY1_{k,l} \ \text{ if } \ NNXYA < 342 \\ A_{k,l} \leftarrow NmzY2_{k,l} \ \text{ if } \ NNXYA \geq 342 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$NNmzY3 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NmzY3_{k,l}$$

$$NYmnz12 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow NmzY1_{k,l} \ \text{ if } \ NNXYA < 342 \\ A_{k,l} \leftarrow NmzY2_{k,l} \ \text{ if } \ NNXYA \geq 342 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$NYmnz13 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow NmzY3_{k,l} \ \text{ if } \ NNXYA \geq 342 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ if } \ NNXYA < 342 \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

NYmnz11 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

NYmnz12 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

NYmnz13 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$$NNYmnzY11 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NYmnz11_{k,l} \qquad NNYmnz12 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NYmnz12_{k,l}$$

$NNYmnzY11 = 1000$ $\quad NNYmnz12 = 1000$

$$NNYmnzY13 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NYmnz13_{k,l}$$

$NNYmnzY13 = 0$

დანართი 1 (გაგრძელება)

არამთავარი კოეფიციენტების კოდირება ჰაფმანის იმ ცხრილებით, რომლებისთვისაც Z=0.

$$ZY2 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow ZY_{k,l+1} \\ A \end{array} \right.$$

$$r := 7$$

$$RYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \quad \text{if } ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \quad \text{if } 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \quad \text{if } 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \quad \text{if } 8 \le ZY2_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 10 \quad \text{if } 16 \le ZY2_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 12 \quad \text{if } 32 \le ZY2_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 13 \quad \text{if } 64 \le ZY2_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \quad \text{otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$NNYA0 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \sum_{k=k}^{k} \sum_{l=0}^{62} RYA_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$SNNYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow NNYA0_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$NNNYA := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} SNNYA_{k,l} \quad NNNYA = 30116 \ \text{biti} \quad NYA := \sum_{k=0}^{1023} \sum_{l=0}^{62} RYA_{k,l} \quad NYA = 30116$$

$$NA = 53$$

KB1 := stack(augment(KKskan), augment(KKskan))

KB2 := stack(augment(KB1), augment(KB1))

KB3 := stack(augment(KB2), augment(KB2))

KB4 := stack(augment(KB3), augment(KB3))

KB5 := stack(augment(KB4), augment(KB4))

KB6 := stack(augment(KB5), augment(KB5))

KB7 := stack(augment(KB6), augment(KB6))

KB8 := stack(augment(KB7), augment(KB7))

KB9 := stack(augment(KB8), augment(KB8))

KB10 := stack(augment(KB9), augment(KB9))

$$DD1 := \begin{pmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 2 & 3 \end{pmatrix}$$

$$DD2 := DD1^{T}$$

$$DD := \left| \begin{array}{l} DD1 \quad \text{if } skan = 1 \\ DD2 \quad \text{if } skan = 2 \end{array} \right.$$

DDskan =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	...

$$NKA := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{NA-1} DDskan_{k,l} \qquad NKA = 156 \qquad \text{biti}$$

$$Rskan := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } KKskan_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } 2 \le KKskan_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \text{ if } 4 \le KKskan_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 8 \le KKskan_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 5 \text{ if } 16 \le KKskan_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 32 \le KKskan_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 7 \text{ if } 64 \le KKskan_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

Rskan =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	6	5	5	5	6	4	4	4	3	...

მთლიანი გამოსახულების შესაბამისი ტრანსფორმანტის სტატისტიკის გათვალისწინება (R-ის მონაცემები)

$Rskan := 7$

$$RYA7 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \text{ if } 8 \le ZY2_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 10 \text{ if } 16 \le ZY2_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 12 \text{ if } 32 \le ZY2_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 13 \text{ if } 64 \le ZY2_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$Rskan := 6$

$$RYA6 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \text{ if } 8 \le ZY2_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 10 \text{ if } 16 \le ZY2_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 11 \text{ if } 32 \le ZY2_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$Rskan := 5$

$$RYA5 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \text{ if } 8 \le ZY2_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 9 \text{ if } 16 \le ZY2_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$Rskan := 4$

$$RYA4 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 7 \text{ if } 8 \le ZY2_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Rskan := 3$$

$$RYA3 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \ \text{ if } \ ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \ \text{ if } \ 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 5 \ \text{ if } \ 4 \le ZY2_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Rskan := 2$$

$$RYA2 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 2 \ \text{ if } \ ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \ \text{ if } \ 2 \le ZY2_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$Rskan := 1$$

$$RYA1 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \ \text{ if } \ ZY2_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$SNNYAK := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow RYA1_{k,l} \ \text{ if } \ KB10_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA2_{k,l} \ \text{ if } \ 2 \le KB10_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA3_{k,l} \ \text{ if } \ 4 \le KB10_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA4_{k,l} \ \text{ if } \ 8 \le KB10_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA5_{k,l} \ \text{ if } \ 16 \le KB10_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA6_{k,l} \ \text{ if } \ 32 \le KB10_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow RYA7_{k,l} \ \text{ if } \ 64 \le KB10_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \ \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$NNYA := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0..62 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \displaystyle\sum_{k=k}^{k} \sum_{l=0}^{62} SNNYAK_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$NNNYAK := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..1023 \\ \quad \text{for } l \in 0 \\ \quad\quad A_{l,k} \leftarrow NNYA_{k,l} \\ A \end{array} \right.$$

$$NYAK := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NNNYAK_{k,l}$$

$NYAK = 29654$ biti

დანართი 1 (გაგრძელება)

არამთავარი კოეფიციენტების მასივის არანულოვანი კოეფიციენტების რაოდენობა სტატისტიკის მიხედვით NA

$\mathbf{NA} = 53$

სტატისტიკის მიხედვით NA რაოდენობის კოეფიციენტებისათვის საჭირო ბიტების რაოდენობა NKA

$\mathbf{NKA} = 156$ **biti**

მინიზონების გათვალისწინებით

```
SNNYmnz1 := | for k ∈ 0
             |   for l ∈ 0..1023
             |     | A[k,l] ← NA  if  Z82Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA ≥ 342
             |     | A[k,l] ← 42  if  Z81Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA ≥ 342
             |     | A[k,l] ← 35  if  Z772Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA ≥ 342
             |     | A[k,l] ← 30  if  Z771Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA ≥ 342
             |     | A[k,l] ← NA  if  Z74Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA < 342
             |     | A[k,l] ← 42  if  Z73Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA < 342
             |     | A[k,l] ← 35  if  Z72Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA < 342
             |     | A[k,l] ← 30  if  Z71Y[k,l] = 1 ∧ NNXYA < 342
             |     | A[k,l] ← 27  if  Z62Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 24  if  Z61Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 20  if  Z52Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 18  if  Z51Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 14  if  Z42Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 11  if  Z41Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 9  if  Z32Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 7  if  Z31Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 5  if  Z22Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 4  if  Z21Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 2  if  Z1Y[k,l] = 1
             |     | A[k,l] ← 0  otherwise
             | A
```

მინიზონების გარეშე

```
SNNY := | for k ∈ 0
        |   for l ∈ 0..1023
        |     | A[k,l] ← NA  if  Z7Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 27  if  Z6Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 20  if  Z5Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 14  if  Z4Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 9  if  Z3Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 5  if  Z2Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 2  if  Z1Y[k,l] = 1
        |     | A[k,l] ← 0  otherwise
        | A
```

SNNYmnz1 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	2	9	7	7	4	5	2	2	...

$$\mathbf{NYmnz1} := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} \mathbf{SNNYmnz1}_{k,l} \qquad \mathbf{NYmnz1} = 15734 \quad \textbf{biti}$$

მინიზონების გარეშე

SNNY =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	2	9	9	9	5	5	2	2	...

$$NNY := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} SNNY_{k,l} \qquad NNY = 18370 \quad biti$$

სტატისტიკის გათვალისწინებით

გამოსახულების საერთო სტატისტიკაში ნულოვანი კოეფიციენტების რაოდენობის გათვალისწინება

```
KKskan1 := | for k ∈ 0
           |   for l ∈ 0..62
           |     | A[k,l] ← 0  if  KKskan[k,l] > 0 ∧ l ≤ NA − 1
           |     | A[k,l] ← 1  if  KKskan[k,l] = 0 ∧ l ≤ NA − 1
           |     | A[k,l] ← 0  otherwise
           | A
```

KKskan1 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$$KKz1 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1} KKskan1_{k,l} \qquad KKz21 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{3} KKskan1_{k,l} \qquad KKz22 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{4} KKskan1_{k,l}$$

$KKz1 = 0$ $\qquad$ $KKz21 = 0$ $\qquad$ $KKz22 = 0$

$$KKz31 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{6} KKskan1_{k,l} \qquad KKz32 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{8} KKskan1_{k,l} \qquad KKz41 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{10} KKskan1_{k,l}$$

$KKz31 = 0$ $\qquad$ $KKz32 = 0$ $\qquad$ $KKz41 = 0$

$$KKz42 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{13} KKskan1_{k,l} \qquad KKz51 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{17} KKskan1_{k,l} \qquad KKz52 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{19} KKskan1_{k,l}$$

$KKz42 = 0$ $\qquad$ $KKz51 = 0$ $\qquad$ $KKz52 = 0$

$$KKz61 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{23} KKskan1_{k,l} \qquad KKz62 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{26} KKskan1_{k,l} \qquad KKz71 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{29} KKskan1_{k,l}$$

$KKz61 = 0$ $\qquad$ $KKz62 = 0$ $\qquad$ $KKz71 = 0$

$$KKz72 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{34} KKskan1_{k,l} \qquad KKz73 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{41} KKskan1_{k,l} \qquad KKz74 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{NA-1} KKskan1_{k,l}$$

$KKz72 = 1$ $\qquad$ $KKz73 = 3$ $\qquad$ $KKz74 = 8$

$$KKz771 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{29} KKskan1_{k,l} \qquad KKz772 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{34} KKskan1_{k,l} \qquad KKz81 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{41-} KKskan1_{k,l}$$

$$KKz82 := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{NA-1} KKskan1_{k,l}$$

KKz771 = 0
KKz772 = 1
KKz73 = 3
KKZ81 = 3
KKZ82 = 8

$$SZ1Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z1Y_{k,l} \quad SZ21Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z21Y_{k,l} \quad SZ22Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z22Y_{k,l}$$

$SZ1Y = 129$ $\quad SZ21Y = 48$ $\quad SZ22Y = 62$

$$SZ31Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z31Y_{k,l} \quad SZ32Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z32Y_{k,l} \quad SZ41Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z41Y_{k,l}$$

$SZ31Y = 97$ $\quad SZ32Y = 60$ $\quad SZ41Y = 15$

$$SZ42Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z42Y_{k,l} \quad SZ51Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z51Y_{k,l} \quad SZ52Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z52Y_{k,l}$$

$SZ42Y = 170$ $\quad SZ51Y = 122$ $\quad SZ52Y = 36$

$$SZ61Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z61Y_{k,l} \quad SZ62Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z62Y_{k,l} \quad SZ71Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z71Y_{k,l}$$

$SZ61Y = 64$ $\quad SZ62Y = 64$ $\quad SZ71Y = 25$

$$SZ72Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z72Y_{k,l} \quad SZ73Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z73Y_{k,l} \quad SZ74Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z74Y_{k,l}$$

$SZ72Y = 56$ $\quad SZ73Y = 30$ $\quad SZ74Y = 20$

$$SZ771Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z771Y_{k,l} \quad SZ772Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z772Y_{k,l} \quad SZ81Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z81Y_{k,l}$$

$SZ771Y = 25$ $\quad SZ772Y = 56$ $\quad SZ81Y = 30$

$$SZ82Y := \sum_{k=0}^{0}\sum_{l=0}^{1023} Z82Y_{k,l}$$

$SZ82Y = 20$

$NYmnz := NYmnz1 - NNYmnz2$

Z71Y =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

Z771Y =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...

$NYmnz21 = 306$ biti $\quad NYmnz22 = 306$ biti

$NYmnz = 15428$ biti

```
NNYmnz2 := | for  k ∈ 0
           |   for  l ∈ 0
           |      | A ← NYmnz21  if  NNXYA < 342
           |      | A ← NYmnz22  if  NNXYA ≥ 342
           |      | A ← 0   otherwise
           | A
```

$NNYmnz2 = 306$ biti

NNY = 18370 biti   NYmnz1 = 15734 biti   NYmnz2 = 15428 biti

NYmnz3 = 15428 biti   NYmnz4 = 0 biti

კოდირებისთვის საჭირო ბიტების რაოდენობის გამოთვლა

NYmnz11 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

ზონური კოდირების ფრაგმენტული მონაცემები

RYM=

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	15	5	7	9	11	7	5	7	5	...

NNYz =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	...

SNNYmnz1 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	2	9	7	7	4	5	2	2	...

NYmnz12 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

SNNYA =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4	2	12	20	10	6	8	4	4	...

NYzhfr := RYM + NNYz + SNNYmnz1 + NYmnz12 + SNNYA

NYzhfr =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	24	12	32	40	32	21	22	16	14	...

NYzhfr =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	24	12	32	40	32	21	22	16	14	...

$$NNYzh := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NYzhfr_{k,l}$$

NNYzh = 57648 biti   NYzh := NNYzh + NYma

NYzh = 57654 biti   NYh = 55771 biti

ჩაწერეთ მერვე ზონაში მინიზონების რაოდენობის აღმნიშვნელი ციფრი:
2 – 2 მინიზონა; 4 – 4 მინიზონა

mn := 2

$$NNYmnz4 := \begin{cases} NYmnz12 & \text{if } mn = 2 \\ NYmnz13 & \text{if } mn = 4 \wedge NNXYA \ge 342 \end{cases}$$

$$SNNYmnz := \begin{cases} SNNYmnz3 & \text{if } mn = 2 \\ SNNYmnz4 & \text{if } mn = 4 \wedge NNXYA \ge 342 \end{cases}$$

ზონურ-სტატისტიკური კოდირების ფრაგმენტული მონაცემები

RYM=

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	15	5	7	9	11	7	5	7	5	...

NNYz =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	...

SNNYmnz =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2	2	9	7	7	4	5	2	2	...

NNYmnz4 =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	...

NNNYAK =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4	2	12	20	10	6	8	4	4	...

$$NYzhfrst := RYM + NNYz + SNNYmnz + NNYmnz4 + NNNYAK$$

NYzhfrst =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	24	12	32	40	32	21	22	16	14	...

$$NNYzhst := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NYzhfrst_{k,l} \qquad NNYzhst = 56880 \qquad \text{biti}$$

$$NYzhst := NNYzhst + NYmax + NKA \qquad NYzhst = 57042 \qquad \text{biti}$$

ადაპტური კოდირება

$$NNdam := \left| \begin{array}{l} \text{for } \ k \in 0 \\ \quad \text{for } \ l \in 0..1023 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow 1 \\ A \end{array} \right.$$

NNdam =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...

$$HybNYzh := \left| \begin{array}{l} \text{for } \ k \in 0 \\ \quad \text{for } \ l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow NYhfr_{k,l} \ \text{ if } \ NYhfr_{k,l} < NYzhfr_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow NYzhfr_{k,l} \ \text{ if } \ NYhfr_{k,l} \ge NYzhfr_{k,l} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

HybNYzh =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	24	12	32	40	31	21	22	15	14	...

$$NNHybNYzh := HybNYzh + NNdam$$

NNHybNYzh =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	25	13	33	41	32	22	23	16	15	...

$$HYBNYzh := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NNHybNYzh_{k,l} \qquad HybNYzh := HYBNYzh + NYmax$$

HybNYzh = 56181 biti

$$HybNYzhst := \left| \begin{array}{l} \text{for } \ k \in 0 \\ \quad \text{for } \ l \in 0..1023 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow NYhfr_{k,l} \ \text{ if } \ NYhfr_{k,l} < NYzhfrst_{k,l} \\ A_{k,l} \leftarrow NYzhfrst_{k,l} \ \text{ if } \ NYhfr_{k,l} \ge NYzhfrst_{k,l} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

HybNYzhst =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	24	12	32	40	31	21	22	15	14	...

$$NNHybNYzhst := HybNYzhst + NNdam$$

NNHybNYzhst =

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	25	13	33	41	32	22	23	16	15	...

$$HYBNYzhst := \sum_{k=0}^{0} \sum_{l=0}^{1023} NNHybNYzhst_{k,l}$$

HybNYzhst=HYBYzhst+NKA+NYmax

HybNYzhst=56198 biti

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული კოეფიციენტების ჰაფმანის კოდირებისას საჭირო ბიტების რაოდენობა

NYh = 55771 biti

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული კოეფიციენტების ზონური კოდირებისას საჭირო ბიტების რაოდენობა

NYzh = 57654 biti

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული კოეფიციენტების ზონურ-სტატისტიკური კოდირებისას საჭირო ბიტების რაოდენობა

NYzhst = 57042 biti

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული კოეფიციენტების ადაპტური ზონური კოდირებისას საჭირო ბიტების რაოდენობა

HybNYzh = 56181 biti

დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის დაკვანტული კოეფიციენტების ადაპტური ზონურ-სტატისტიკური კოდირებისას საჭირო ბიტების რაოდენობა

HybNYzhst= 56198 biti

პირველადი გამოსახულება

კომპრესირებული გამოსახულება

დანართი 2. ფერადი გამოსახულების დისკრეტული კოსინუსური გარდასახვის ტრანსფორმანტების დაკვანტული კოეფიციენტების მაქსიმალური მნიშვნელობებისა და შესაბამისი ორობითი სიმბოლოების დადგენის პროგრამა სიკაშკაშის (Y) და ფერსხვაობითი (C_r და C_b) შემდგენებისათვის

$$DFYK := \begin{vmatrix} DFY00Sxv \text{ if } Skanir = 1 \\ DFY00Sxv^T \text{ if } Skanir = 2 \end{vmatrix}$$

$m := 0...7$ $n := 0...7$

$m := 0$ $n := 0$

$md8 := 0..31$ $nd8 := 0..31$

$$DFY2d8_{md8,nd8} := DFYK_{8 \cdot md8+m,\, 8 \cdot nd8+n}$$

$$DFY00 := \begin{vmatrix} \text{for } k \in 0..31 \\ \quad \text{for } l \in 0..31 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \text{round}\left(DFY2d8_{k,l}\right) \\ A \end{vmatrix}$$

$max(DFY00) = 79$ $min(DFY00) = 0$

$MKY := MKYLen$

$$RY := \begin{vmatrix} \text{for } k \in 0..7 \\ \quad \text{for } l \in 0..7 \\ \quad\quad \begin{vmatrix} A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } MKY_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } 2 \le MKY_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \text{ if } 4 \le MKY_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 8 \le MKY_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 5 \text{ if } 16 \le MKY_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 32 \le MKY_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 7 \text{ if } 64 \le MKY_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{vmatrix} \\ A \end{vmatrix}$$

$$MKYLen := \begin{pmatrix} 79 & 48 & 35 & 11 & 5 & 2 & 2 & 1 \\ 31 & 29 & 15 & 8 & 4 & 2 & 1 & 1 \\ 16 & 15 & 13 & 6 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 6 & 6 & 4 & 3 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad RYLen = \begin{pmatrix} 7 & 6 & 6 & 4 & 3 & 2 & 2 & 1 \\ 5 & 5 & 4 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ 5 & 4 & 4 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$m := 0...7$ $n := 0...7$ $m := 0$ $n := 0$

$md8 := 0..15$ $nd8 := 0..15$ $md8 := 0..15$ $nd8 := 0..15$

$DFCr2d8_{md8,nd8} := DFCr00Sxv_{8\cdot md8+m,8\cdot nd8+n}$ $DFCb2d8_{md8,nd8} := DFCb00Sxv_{8\cdot md8+m,8\cdot nd8+n}$

$$DFCr00 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..15 \\ \quad \text{for } l \in 0..15 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \text{round}\left(DFCr2d8_{k,l}\right) \\ A \end{array} \right. \qquad DFCb00 := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..15 \\ \quad \text{for } l \in 0..15 \\ \quad\quad A_{k,l} \leftarrow \text{round}\left(DFCb2d8_{k,l}\right) \\ A \end{array} \right.$$

$\max(DFCr00) = 23$ $\min(DFCr00) = 0$ $\max(DFCb00) = 17$ $\min(DFCb00) = 0$

$MKCr := MKCrLen$ $MKCb := MKCbLen$

$$RCr := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..7 \\ \quad \text{for } l \in 0..7 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } MKCr_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } 2 \le MKCr_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \text{ if } 4 \le MKCr_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 8 \le MKCr_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 5 \text{ if } 16 \le MKCr_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 32 \le MKCr_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 7 \text{ if } 64 \le MKCr_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \text{ if } 64 \le MKCr_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right. \qquad RCb := \left| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..7 \\ \quad \text{for } l \in 0..7 \\ \quad\quad \left| \begin{array}{l} A_{k,l} \leftarrow 1 \text{ if } MKCb_{k,l} = 1 \\ A_{k,l} \leftarrow 2 \text{ if } 2 \le MKCb_{k,l} \le 3 \\ A_{k,l} \leftarrow 3 \text{ if } 4 \le MKCb_{k,l} \le 7 \\ A_{k,l} \leftarrow 4 \text{ if } 8 \le MKCb_{k,l} \le 15 \\ A_{k,l} \leftarrow 5 \text{ if } 16 \le MKCb_{k,l} \le 31 \\ A_{k,l} \leftarrow 6 \text{ if } 32 \le MKCb_{k,l} \le 63 \\ A_{k,l} \leftarrow 7 \text{ if } 64 \le MKCb_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 8 \text{ if } 64 \le MKCb_{k,l} \le 127 \\ A_{k,l} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ A \end{array} \right.$$

$$MKCrLen = \begin{pmatrix} 23 & 6 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8 & 3 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad RCrLen = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$MKCbLen = \begin{pmatrix} 12 & 6 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad RCbLen = \begin{pmatrix} 4 & 3 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$