

**UWARUNKOWANIA FIZJOLOGICZNE  
I TECHNICZNE WPŁYWAJĄCE NA PERCEPCJĘ  
OBRAZU  
OBSERWOWANEGO NA EKRANIE MONITORA**

PHYSIOLOGICAL AND TECHNICAL CONDITIONS,  
INFLUENCING PERCEPTION OF THE MONITOR PICTURE

**Krystian Pyka**

Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza

**Słowa kluczowe: obraz, kontrast, luminancja, czułość**  
Keywords: image, contrast, luminance, sensitivity

## **Wprowadzenie**

Dla społeczeństwa informacyjnego obraz na monitorze to jedna z ważniejszych form przekazywania informacji. Dlatego postępuje wypieranie map analogowych przez kartograficzne publikacje internetowe, burzliwie rozwijają się serwisy informacji geograficznej.. Rozwiązania techniczno-informatyczne są już tak doskonałe, że znika problem sprawnej eksploatacji bogatych graficznie map, w tym także map fotograficznych o dobrej rozdzielczości.

Problem percepcji obrazu na ekranie monitora komputerowego tylko pozornie jawi się jako trywialny. Tymczasem zawiera w sobie wiele czynników powodujących, że postrzeganie tego samego obrazu, przez tego samego obserwatora, na tym samym monitorze, może być ocenione inaczej podczas sesji dziennej, a inaczej wieczornej. Przy postrzeganiu obrazu na monitorze mamy bowiem do czynienia ze spletem złożonych uwarunkowań fizjologicznych z technicznymi. Inspiracją do podjęcia tematu są doświadczenia zebrane przez autora podczas już ponad dwuletniego okresu funkcjonowania usługi „mapy z lotu ptaka” w ramach portalu ”Wrota Małopolski”.

Przypadek obrazów wielotonalnych w tym ortofotomap należy do najtrudniejszych pod względem zagwarantowania optymalnej wizualizacji. Ponadto potencjalni odbiorcy często oczekują od ortofotomap lotniczych znacznie większej wyrazistości aniżeli faktycznie mogą one przenieść. Celem naświetlenia problemu i wyjaśnienia przyczyn pewnych zjawisk, niezrządkiem zaskakujących obserwatora, w pracy omówiono czynniki wpływające na percepcję obrazu obserwowanego na monitorze, ze szczególnym uwzględnieniem rozdzielczości przestrzennej i kontrastu; pominięto natomiast problem barwoczułości, gdyż problem ten wart jest osobnego potraktowania.

## Wybrane czynniki kształtujące percepcję obrazu przez człowieka

System wzrokowy człowieka (ang. HVS- Human Visual System), pomimo wielu dociekań i badań naukowych, jest wciąż - zwłaszcza w aspekcie percepcji bodźców świetlnych – nie do końca rozpoznany. Reakcja oka ludzkiego na pobudzenie światłem jest bardzo złożona. Zależy bowiem od składu spektralnego światła, luminancji składowych spektralnych i luminancji wypadkowej, kontrastu lokalnego i globalnego sceny oraz charakterystyki częstotliwościowej promieniowania w poszczególnych fragmentach kadru (Wyszecki, 1986).

Przypomnijmy, że luminancja elementu powierzchni w określonym kierunku to jego światłość odniesiona do pola rzutu prostokątnego tego elementu na płaszczyznę prostopadłą do rozważanego kierunku. W uproszczeniu można stwierdzić, że luminancja obiektu (oświetlonego przez słońce lub sztuczne źródło światła) to ta część światła która odbija się od obiektu w kierunku obserwatora lub ogólniej – odbiornika (oka człowieka, kamery). Natomiast w przypadku obrazu wyświetlanego na monitorze mamy do czynienia z luminancją plamek matrycy ekranu, które świecą światłem własnym a nie odbitym. Jednostką luminancji, zgodnie z (PN ISO 2001) jest kandela na m<sup>2</sup> (cd/m<sup>2</sup>). Wartości luminancji podane dla monitorów odnoszą się do kierunku prostopadłego do ekranu.

Fenomen widzenia ludzkiego objawia się w kilku aspektach. Jednym z nich jest inny udział czopków i pręcików w widzeniu dziennym (fotopowym), nocnym (skotopowym) i zmierzchowym (mezopowym). Inny fenomen widzenia ludzkiego polega na jego zdolności adaptacyjnej do panujących warunków oświetlenia co powoduje, że oko obiektywniej ocenia względne różnice bodźców świetlnych niż bezwzględne. Formą adaptacji oka jest zmienny rozmiar źrenicy wejściowej w funkcji luminancji docierających bodźców świetlnych. Jedną z implikacji własności adaptacyjnej jest fakt, że w systemie wzrokowym może powstać to samo wrażenie psychofizyczne pomimo różnych konfiguracji fal świetlnych docierających z zewnątrz do oka.

**Czułość na luminancję** (ang. *stimulus sensitivity*) określa jak zmienia się wrażenie jasności w funkcji zmian luminancji obserwowanej sceny. Luminancja sceny to przestrzenny rozkład luminancji wysyłanej w kierunku obserwatora przez detale obiektów tworzących obserwowaną scenę. Pręciki są czułe w zakresie luminancji 10<sup>-6</sup> do 10 cd/m<sup>2</sup> a czopki w zakresie 10<sup>-2</sup> do 10<sup>8</sup> cd/m<sup>2</sup> (Hood, 1986; Matkovic, 1998). Wrażenie jasności odbierane przez oko jest proporcjonalne do logarytmu luminancji bodźców pochodzących od elementów sceny. Zasada ta określana jest, od nazwiska odkrywcy, jako prawo Fechnera (Hurvitch, 1966).

**Próg kontrastu luminancji.** Zmiany luminancji występujące w obserwowanej scenie można scharakteryzować albo przez stosunek miejsca najjaśniejszego do najciemniejszego, jako kontrast globalny, albo jako stosunek przyrostu luminancji do luminancji otoczenia jaki występuje w określonym miejscu sceny, nazywany kontrastem Webera. To właśnie Weberowi zawdzięczamy odkrycie (1830) proporcjonalnej reakcji oka do względnego przyrostu luminancji:

$$k = \frac{\Delta L}{L}$$

przy czym najmniejszą wielkością współczynnika wykrywalną przez oko jest 0.02 (tzw. frakcja Webera). Niektórzy autorzy przyjmują, że frakcja wynosi 1% (Wyszecki, 1982).

Fracja Webera stanowi próg kontrastu luminancji, poniżej którego zmiany luminancji nie są wykrywane przez oko ludzkie (inaczej: najmniejsza postrzegana przez człowieka różnica luminancji). Na podstawie badań wykonywanych w ostatnich latach (Ward, 1994; Larson, 1997) próg kontrastu formułowany jest poprzez bardziej złożone związki w których występuje zależność od luminancji tła wyrażonej w  $\text{cd/m}^2$ .

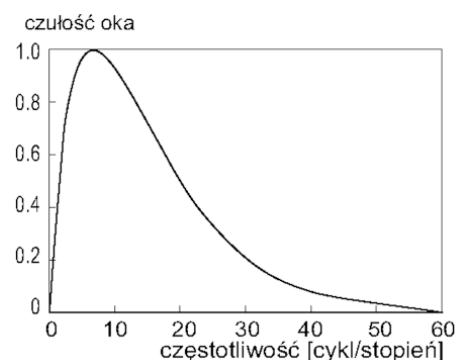
**Zależność kontrastu i częstotliwości przestrzennej.** Oko wykazuje zmienną czułość na kontrast w zależności od częstotliwości przestrzennej fragmentów obrazu. Częstotliwość przestrzenna obrazu jest wyrażana przez liczbę zmian luminancji występujących w określonym kierunku a odniesionych do jednostki długości lub kąta obserwacji. W przypadku scen naturalnych można mówić o wysokiej częstotliwości przestrzennej w miejscu gdzie obraz zawiera wiele – skupionych obok siebie – detali różniących się luminancją, a o niskiej – gdy dominują obszary homogeniczne a zmiany luminancji są znacznie rzadsze.

Związek zachodzący pomiędzy percepcją kontrastu a częstotliwością przestrzenną obrazu opisuje funkcja czułości kontrastu (ang. CSF – *Contrast Sensitivity Function*). Różne badania wskazują, że ekstremum czułości systemu wzrokowego człowieka na kontrast leży w przedziale od 5 do 10 cykli/stopień<sup>1</sup> (Grainger, 1972; Schieber, 1992). Maksimum czułości zależne jest od kąta patrzenia, gdy kąt maleje ekstremum funkcji przesuwa się nieznacznie w stronę większych wartości, odwrotna zależność dotyczy ogólnej luminancji obserwowanego obrazu: przy niższej luminancji ekstremum migruje w kierunku niższych wartości. Wszystkie badania jednoznacznie potwierdzają, że wyższe częstotliwości są stopniowo tłumione, przy 60 cyklach/stopień czułość oka spada do zera oraz, że spadek czułości ma miejsce także w zakresie dużych częstotliwości. O ile zmniejszenie czułości ze wzrostem częstotliwości tłumaczy się przez skończone możliwości oka jako układu optycznego i ma miejsce dla każdego sensora, to tłumienie kontrastu przy krótszej częstotliwości jest kolejnym fenomenem psychofizycznym.

Mannos wprowadził pojęcie znormalizowanej CSF, jej wykres jest ujęty na rysunku 1 (Mannos, 1974).

Znormalizowana funkcja CSF, która wykazuje maksimum dla 8 cykli/stopień, jest uogólnieniem funkcji dla różnych warunków obserwacji, takich jak pole obserwacji, luminancja sceny. Kształt CSF jest zawsze podobny do znormalizowanego, w określonych warunkach inne są jedynie bezwzględne wartości kontrastu. Przy obserwacji obrazu z odległości 57 cm w kącie 1 stopień widzimy odcinek o długości 1 cm, czyli maksimum czułości odpowiada częstotliwości 0,8 cykli/mm, natomiast przy odległości obserwacji obrazu równej 28 cm – 1.6 cykli/mm.

Granica rozdzielczości ludzkiego oka wynosi 60 cykli/stopień czyli jest kątem równym 1', określanym jako ostrość widzenia określona na teście sinusoidalnym (ang. *visual acuity*). Niektórzy autorzy przyjmują mniejszą wartość dla granicy rozdzielczości oka, równą 30 cykli/stopień. Zakładając rozdzielczość w przedziale 30–



Rys. 1. Znormalizowana funkcja CSF

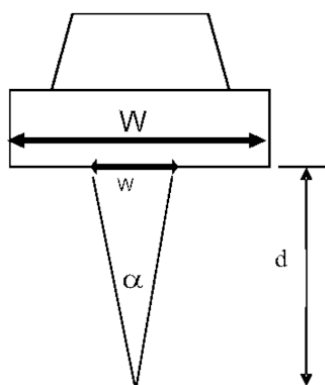
<sup>1</sup> cykl/stopień to liczba cykli mieszczących się w kącie obserwacji 1 stopień; cykl oznacza odcinek testu sinusoidalnego w którym zmiana luminancji odpowiada okresowi funkcji sinus.

60 cykli/stopień dostaniemy dla obserwacji obrazu z odległości 28 cm, po przeliczeniu na jednostkę długości, zakres 6–12 cykli/mm.

Należy podkreślić, że krzywa CSF opisuje reakcję oka ludzkiego tylko na luminancję. Oko filtruje luminancję jak filtr średnioprzepustowy natomiast składowe chromatyczne jak filtr dolnoprzepustowy (czułość jest największa dla niskich częstotliwości, a później stopniowo opada). Ponadto rozpatrując CSF warto nadmienić, że oko ludzkie nieco inaczej reaguje na częstotliwości przestrzenne o różnych kierunkach. Kierunki pionowe i poziome wywołują silniejsze wrażenie niż diagonalne ( $45^\circ$  i  $135^\circ$ ) (Campbell, 1966).

## Obserwacja obrazu na monitorze

Przy obserwacji obrazu na monitorze komputera mamy do czynienia z widzeniem mezo-powym (które zachodzi przy luminancji od  $10^{-2}$  do  $10$  cd/m<sup>2</sup>) oraz częściowo – fotopowym. Takie warunki widzenia uznaje się za najmniej rozpoznane (Matkovic, 1998).



Rys. 2. Relacja pomiędzy rozmiarem ekranu monitora a odcinkiem widzianym w kącie  $\alpha$

**Częstotliwości przestrzenne obrazu.** Dla ustalenia maksymalnych częstotliwości przestrzennych, jakie mogą być obserwowane na monitorze, okreśmy liczbę pikseli wyświetlanych na jednostce długości, posiłkując się rysunkiem 2.

Jeśli poziomemu rozmiarowi ekranu monitora  $W$  odpowiada określona liczba plamek  $C$ , wynikająca z rozdzielczości, to w kącie  $\alpha$  mieści się  $c$  świecących plamek monitora:

$$c = \frac{w}{W} C = \frac{2d \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} C}{W}$$

Zakładając: monitor 17",  $W \times H = 30$  cm x 24 cm, rozdzielczość monitora  $C \times R = 1024 \times 768$ , odległość obserwacji  $d = 50$  cm, kąt  $\alpha = 1$  stopień, dostaniemy  $c = 29,8$ . Zatem maksymalna obserwowana częstotliwość, zgodnie z teorią Shanona-Nyquista, wynosi  $c/2$  czyli 15 cykli/stopień<sup>2</sup>. Dla obserwacji w pionie wartość ta jest podobna.

**Liczba poziomów jasności.** Typowe monitory wyświetlają 256 poziomów jasności, gdyż stosują 8-bitowe kodowanie luminancji. Z punktu widzenia analizy luminancji obrazu nie jest istotne, że 256 poziomów dotyczy niezależnie każdego składnika barwnego RGB. Ponieważ oko odbiera luminancję logarytmicznie, a próg kontrastu oka wynosi 1–2%, toteż obserwator może rozróżnić maksymalnie 50–100 poziomów jasności.

**Korekcja gamma.** Monitory mają szczególną właściwość polegającą na nieliniowym przekształcaniu jasności  $I$  zapisanych w obrazie cyfrowym. Na podstawie wartości  $I$  karta graficzna generuje sygnał elektryczny o napięciu  $V$ , a ten z kolei jest przekształcanie na intensywność świecenia plamek ekranu zgodnie z poniższą zależnością zwaną równaniem gamma:

$$L_m = A \cdot I^\gamma + B$$

gdzie

- $L_m$  – luminancja świecenia monitora wyrażona w  $\text{cd/m}^2$ ,
- $\gamma$  – współczynnik gamma monitora,
- $A, B$  – współczynniki proporcjonalności i przesunięcia (ang. *gain* i *offset*).

Jeśli gamma monitora jest większe od 1 (dla monitorów typu CRT przyjmuje wartości z zakresu 1.7–2.7) wówczas nieliniowość przetworzenia sygnału na luminancję powoduje niekorzystne zjawisko w postaci przyciemniania miejsc najciemniejszych (tzw. cieni) i rozjaśnienia najjaśniejszych (tzw. świateł).

Dla przeciwdziałania temu zjawisku przy wizualizacji wprowadza się tzw. korekcję gamma, która polega na zastosowanie funkcji potęgowej o wykładniku  $\gamma' < 1$ ; co kompensuje niekorzystne rozjaśnianie świateł.

## Wnioski

Jak wykazano, obraz wyświetlany na monitorze a oglądany z odległości ok. 50 cm z reguły nie osiąga takich granicznych częstotliwości przestrzennych jakie może rejestrować system wzrokowy człowieka. Dla typowych monitorów stosunek maksymalnej wyświetlanej częstotliwości do granicy rozdzielczości oka wynosi ok. 1/2. Dlatego jeśli obraz jest wyświetlany tak, że 1 piksel obrazu jest odwzorowany na 1 plamce ekranu, to moglibyśmy go oglądać z odległości 1 m, a rozróżnialność detali byłaby podobna jak z typowej odległości 0,5 m, przy czym wzrok pracuje wtedy na granicy swoich możliwości. Projektowanie optymalnych warunków wizualizacji obrazów dla maksymalnych częstotliwości na które reaguje oko ludzkie powinno być ograniczone do obrazów o dużych kontrastach, co w praktyce może mieć miejsce tylko dla grafiki wektorowej.

W przypadku obrazów wielotonalnych optymalne warunki wizualizacji powinny być projektowane z uwzględnieniem maksimum czułości oka. Jak wynika z przebiegu krzywej CSF maksimum to przypada na częstotliwości 5–10 cykli/stopień, czyli średnio jest to połowa z maksymalnych częstotliwości wyświetlanych na monitorze. Zatem, z typowej odległości, obserwator widzi najlepiej detale o częstotliwości 4 piksele/stopień, np. przemienne linie czarne i białe, każda o szerokości 2 piksele. Natomiast jeśli chcemy oglądać detale, które w obrazie są liniami o szerokości 1 piksela (np. krawędź drogi) przy najwyższym w danych uwarunkowaniach kontraście, to należy powiększyć obraz tak, aby 1 piksel obrazu był wyświetlany na 2 plamkach monitora. Wtedy bowiem, z odległości 0,5 m, oglądamy je przy częstotliwości ok. 8 cykli/stopień, przy której funkcja CSF osiąga maksimum. Posiłkując się formułą wynikającą z rysunku 2 łatwo obliczyć, że dla ortofotomapy zbudowanej z pikseli o rozmiarze terenowym 30 cm optymalną skalą wyświetlania obrazu jest 1:500, natomiast gdy piksel wynosi 1m to zalecany jest zakres skalowy 1:1500–1:2000 (przy typowym monitorze, uprzednio scharakteryzowanym).

Problem korekcji gamma dotyczy głównie monitorów starszej generacji, które nie zawsze mają zaimplementowaną korekcję w odpowiednio szerokim przedziale. Można temu przeciwdziałać poprzez softwarową korekcję obrazów. Każdy program obsługujący obrazy wielotonalne wyświetla je nieco inaczej, gdyż inaczej realizuje równanie gamma (dochodzi jeszcze nie omawiany w pracy problem odtwarzania barw).

<sup>2</sup> Przy takich założeniach cykl nie odpowiada testowi sinusoidalnemu lecz prostszemu – paskowemu.

Podstawowym problemem przy odczytywaniu obrazów wielotonalnych (zwłaszcza takich jak ortofotomapa) są obiekty o małych rozmiarach i niskim kontraście lokalnym. Im mniejszy jest kontrast szczegółu w stosunku do otoczenia tym mniejsza jest szansa na jego rozpoznanie w obrazie. Zatem nie można wykluczyć sytuacji w której wykryjemy w obrazie detal o rozmiarach mniejszych od piksela terenowego i na odwrót – mogą być problemy z rozpoznaniem szczegółu o rozmiarach odpowiadających kilku pikselom. Należy pamiętać, że kontrast wraz z rozmiarem piksela kształtują rzeczywistą rozdzielczość przestrzenną.

### Literatura

- Campbell F.W., Kulikowski J.J., 1966: Orientational selectivity of the human visual system. *J. Physiol.* 187, 1966.
- Grainger E.M., Cupery K.N., 1992: An optical merit function (SQF) which correlates with subjective image judgments, *Photographic Science and Engineering*, Vol 16, #3.
- Hood D., Finkelstein, M., 1986: Sensitivity to light. In Handbook of Perception and Human Performance: 1. Sensory Processes and perception. Wiley, New York, K. Boff, L. Kaufman, and J. Thomas, Eds., vol. 1.
- Hurvitch L., Jameson D. 1966: The perception of brightness and darkness. Allyn and Bacon, Boston 1996.
- Larson G.W., Rushmeier H., Piatko C., 1997: A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes. Technical Report LBNL-39882, Lawrence Berkeley National Laboratory, March 1997.
- Mannos J.L., Sakrison D.J., 1974: The Effects of a Visual Fidelity Criterion on the Encoding of Images. IEEE Transactions on Information Theory, pp. 525-535, Vol. 20, No 4, (1974).
- Matkovic K., 1998: Tone Mapping Techniques and Color Image Difference in Global Illumination. Ph. Thesis, Vienna Technical University 1998.
- PN-ISO 31-6:2001: Norma Wielkości fizyczne i jednostki miar. Część 6: Światło i pokrewne promieniowania elektromagnetyczne.
- Schieber F., 1992: Aging and the senses. [In:] J.E. Birren, R. Sloan & G. Cohen (Eds.), *Handbook of mental health and aging*. New York: Academic Press.
- Ward G., 1994: A Contrast-Based Scalefactor for Luminance Display. Graphics Gems IV, Ed. by P.S. Heckbert, pp. 415-421, 1994.
- Wyszecki G., Stiles W.S., 1982: Color Science, Concept and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley and Sons ONC NY 1982.
- Wyszecki G., 1986: Color appearance. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of perception and human performance*,

### Summary

*The study presents an analysis of factors forming the perception of the computer monitor picture. The subject is important from the GIS point of view, especially the internet geographic information services. The inspiration for taking up this subject are the experiences gathered for nearly two years of functioning service: „Bird's eye view map” being a part of the „Wrota Małopolski” portal.*

*The study describes the crucial factors shaping the Human Visual Perception: colour sensitivity, stimulus sensitivity, threshold contrast, alternating reaction to contrast depending on spatial frequency. Most of the attention has been given to the CSF – Contrast Sensitivity Function of the human eye. Also, the law of logarithmic eye reaction to luminance changes has been mentioned. The said laws have been illustrated graphically and registered as mathematic formulas.*

*A further part of the study characterizes a problem of visualization of the picture in the monitor. Using sample parameters of modern monitors, the rules of calculating maximum projected frequency has been presented. Furthermore, the changes of picture frequencies depending on the observation distance changes were described.*



*In the following part of the study, an opinion on the maximum eye sensitivity to contrast, being the critical phenomenon for picture perception has been presented. It has been proved, that the maximum human eye sensitivity is due to frequencies twice less than maximum frequencies projected on a medium class monitor. There have been presented samples of lines configuration on a monitor, which an observer can see best. Such knowledge helps in optimal designing of the picture size and contrast of its finest elements.*

*It has been also pointed out to the fact that the typical radiometric resolution, giving 256 of the stimulus is less than the potential abilities of imaging systems, both photographic and electronic. It has been explained when software gamma correction of the picture is required as well as its performance.*

*The study ends with concrete indications on such pictures preparation, such as maps and pictures so that the observer can see the maximum details which increases graphic transmission communication.*

dr inż. Krystian Pyka  
krisfoto@agh.edu.pl  
tel. (0-12) 617 2302, 608 556 790