

OPONENTINĖS FUNKCIJOS IR SPALVŲ SKIRIAMOJI GEBA

H. Vaitkevičius, Z. Bliznikas, Ž. Stankevičius

Darbe nagrinėjamas daugiapakopis spalvinio regėjimo modelis. Pirmoje pakopoje optiniai signalai yra keičiami į receptorinius signalus, o antroje pakopoje pastarieji signalai yra keičiami į oponentinių ląstelių signalus. Trečioje pakopoje oponentinių ląstelių signalai yra detektuojami ir atpažįstamos juos atitinkančios spalvos. Dažnai neaišku, kuo reiktų remtis, apibrėžiant signalų keitimą antroje pakopoje. Literatūroje [1, 2] nagrinėjama oponentinių funkcijų skaičiavimo metodika, tačiau minėtuose darbuose neįvertinamas nei receptorių, nei kitų sistemos elementų triukšmas, kuris gali gerokai sumažinti sistemos spalvinę skiriamąją gebą, kuri reiškia santykinu dydžiu V/r^3 ; V – spalvinio kūno tūris; r – sferos, kurioje su tikimybe p , yra spalvos vektoriaus galas, kai optinio signalo parametrai yra pastovūs. Nagrinėjama ortogonalinių oponentinių funkcijų, optimizuojančių sistemos spalvinę skiriamąją gebą, skaičiavimo metodika.

ĮVADAS

Šiuo metu pripažįstama ir taikoma zoninė spalvų suvokimo teorija išsamiai nepaaiškina kūgelių vienpoliarių signalų [3–5] keitimo į dvipoliarius oponentinių ląstelių signalus [6–8] priežasties. Šiuo klausimu nuomonės skiriasi. Viena iš jų [1, 5] aiškina, kad tokia signalų transformacija išplečia spalvinį kūną ir dėl to padidėja spalvų skiriamoji geba. Yra daug būdų tokioms transformacijoms rasti, tačiau vis dėlto neaišku, kaip iš daugelio transformacijų pasirinkti tinkamiausią. Be to, nėra atsižvelgiama ir į tai, kad bet kokia signalų transformacija modifikuoja triukšmus.

Taip pat yra manoma [2], kad, atliekant minėtą transformaciją, spalviniai signalai dekoreliuojami, ir padidėja jų atsparumas trukdžiams. Darbo autoriai irgi neatsižvelgia į receptorių triukšmus bei jų įtaką jautrumui. Tai gi nenuostabu, kad naudojamų modelių savybės skiriasi nuo žmogaus regos sistemos savybių [9]. Darbe [1] analizuojamas modelio jautrumas įvertinus oponentinių ląstelių triukšmus. Savaimė aišku, kad, neįvertinus receptorių triukšmo, tikslinga surasti tokius oponentinius signalus, kurie garantuotų didžiausią spalvos vektoriaus orientacijos pokytį. Tačiau, vei-

kiant receptorių triukšmams, toks signalų keitimas gali šiuos triukšmus dar padidinti ir dėl to gerokai sumažėtų sistemos skiriamoji geba.

Šiame darbe mes analizuojame regos sistemos modelį įvertindami ir receptorių, ir oponentinių ląstelių triukšmus. Palyginus modelio ir žmogaus regos analizatoriaus savybes, daroma išvada, kad abiejų sistemų savybės pakankamai panašios.

I. PROBLEMOS FORMULAVIMAS.

SPALVŲ SKIRIAMOSIOS GEBOS KRITERIJUS

Nagrinėjamas trijų pakopų spalvų skyrimo modelis. Pirmojoje pakopoje trys receptoriai R, G ir B optinį signalą paverčia elektriniu signalu. Antroje pakopoje receptorių signalai paverčiami į oponentinių ląstelių signalus. Paprastumo dėlei laikome, kad šis signalų keitimas yra tiesinis. Trečioje pakopoje veikia spalvų detektoriai, kurie atpažįsta spalvas [3]. Tokiu būdu teoriškai gauname tokią modelio schemą:

$$S(\lambda) \xrightarrow{\Omega_1} R \xrightarrow{\Omega_2} O \longrightarrow D,$$

čia $S(\lambda)$ – spalvinių stimulų daugdara; Ω_1 – operatorius, nusakantis optinio signalo transformaciją į elektrinį signalą; Ω_2 – operatorius, apibrėžiantis optinio signalo pakeitimo į receptorinį signalą procedūrą, t. y. apibūdina stimulo erdvės atvaizdį trimatėje elementų $\{y_i\}$, ($i=1, 2, 3$) erdvėje; D – spalvų detektorių signalų erdvė (jos sudarymo darbe neanalizuojame). Kūgelių signalus galima apskaičiuoti pagal formulę

$$y_i = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} r_i(\lambda) p(\lambda) d\lambda,$$

čia $r_i(\lambda)$, ($i = 1, 2, 3$) – kūgelių spektrinio jautrumo funkcija; $p(\lambda)$ – optinio signalo spektrinio pasiskirstymo funkcija. Operatorius Ω_2 apibūdina receptorių signalų transformaciją į oponentinių ląstelių signalus, t. y. atvaizdį trimatėje erdvėje O, kurios elementus $\{x_j\}$, ($j = 1, 2, 3$) galima ap-

skaičiuoti pagal formulę $x_i = \sum_1^3 a_{ij} y_j$, ($i, j = 1, 2, 3$). Daroma prielaida,

kad funkcijos $x_i(\lambda)$, išreiškiančios oponentinių ląstelių signalų priklausomybę nuo monochromatinio optinio signalo bangos ilgio, yra ortogonalios. Pateikta modelio schema yra supaprastinta, nes neįvertinami triukšmai.

Ankstyvesniame darbe [1] buvo nagrinėta tik oponentinių ląstelių triukšmų įtaka sistemos jautrumui. Dabar analizuojamas atvejis, kai įvertinamas receptorių bei oponentinių ląstelių sukeliamas triukšmas. Taigi nagrinėjama tokia schema:

$$S(\lambda) \xrightarrow{\Omega_1} R = \{y_i + \varepsilon_i\} \xrightarrow{\Omega_2} O = \{x_i + \eta_i\} \longrightarrow D,$$

čia ($i = 1, 2, 3$); ξ_i – pagal normalinį dėsnį su vidurkiu Θ ir dispersija σ^2 pasiskirstę nekoreliuoti atsitiktiniai dydžiai, išreiškiantys receptorių triukšmus, ($i=1,2,3$).

Manome, kad spalva pavaizduojama tašku $\{x_i\}$, trimatėje erdvėje. Veikiant triukšmui, kuris išreiškiamas atsitiktiniu vektoriumi $\Xi = \{\xi_i\}$, ($i=1,2,3$), atstojamasis vektorius Y_ξ fluktuoja. Nustatysim tašką gaubiančios sferos, kurioje tikimybė p_0 yra atstojamojo vektoriaus galas, spindulį, kai receptorių yra žadinamas pastoviu optiniu signalu. Šios sferos spindulį galima nustatyti remiantis žinoma Čebyšovo nelygybe:

$$P(|\Xi| \leq r) \geq 1 - \sum_1^3 \sigma_i^2 / r^2 = p_0.$$

Pasirinkus tikimybės p_0 reikšmę, galima apskaičiuoti spindulio r dydį. Įvertinus transformaciją Ω_2 , oponentinių ląstelių signalo dydis bus lygus $x_{\Sigma i} = \sum \alpha_{ij} x_j + \xi_i$. Kadangi triukšmai nekoreliuoti, tai dydžio $M(\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2)$ dispersiją galima apskaičiuoti pagal formulę

$$(\sigma')^2 = \sigma_1^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij}^2 + 3\sigma_2^2,$$

čia σ_2 – triukšmo η_i dispersija.

Pasinaudojus Čebyšovo nelygybe, surandama, kad $P(M(\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2) \leq r') \geq 1$, $D(M(\xi_1^2 + \xi_2^2 + \xi_3^2)) / (r')^2$. Taigi minėtos sferos spindulys yra matricos $A_1 = \|\alpha_{ij}\|$ koeficientų kvadratų sumos funkcija. Kadangi triukšmo dydis nepriklauso nuo signalo dydžio, tai ir spindulio r' reikšmė nuo jo taip pat nepriklauso. Nustatysime, koks sferų su spinduliu r' skaičius telpa į V tūrio spalvinį kūną. Šis sistemos spalvinį jautrumą apibūdinantis skaičius yra išreiškiamas $\eta = \gamma V / (r')^3$, čia $\gamma = \text{const}$. Taigi ieškosi-
me tokios transformacijos Ω_2 , kuri garantuotų maksimalią η vertę, o funk-

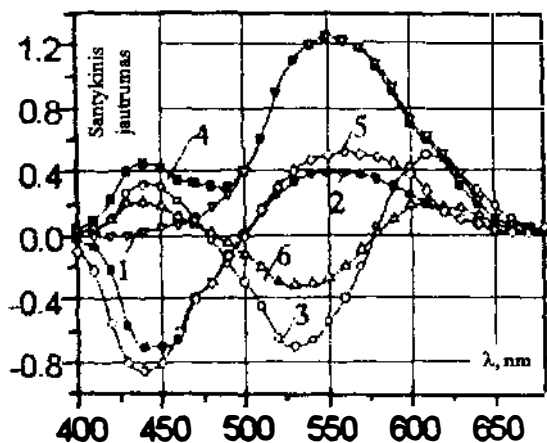
cijos $x_i(\lambda)$ būtų ortogonalios. Skaičiuojant funkcijas $x_i(\lambda)$, buvo įprasta, kad receptorių spektrinis jautrumas apibūdinamas literatūroje [4,10] pateiktomis išraiškomis, o receptorių signalai oponentinių ląstelių įėjime yra baigtinio dydžio (t. y. jie negali būti be galo dideli). Šis reikalavimas užrašomas taip: $\alpha_{ij}x_i(\lambda) \leq c$. Operatorius Ω_2 surastas tik ortogonalios transformacijos tikslumu, bet kurie jo posūkiai nekeičia skiriamosios gebos, t. y. nekeičia santykio η . Norint vienareikšmiai apibūdinti transformaciją Ω_2 , kuri maksimizuotų santykį η , o kartu ir apibrėžtų funkcijas $x_i(\lambda)$, reikia naudotis papildomomis sąlygomis. Žinoma, kad balta šviesa nesužadina dviejų oponentinių ląstelių (t. y. balta šviesa nekeičia vadinamųjų chromatinų ląstelių signalo). Šią sąlygą galima užrašyti taip: $x_i(W) = \int p(W)x_i(\lambda) d\lambda = 0$, ($i = 2, 3$), čia $p(W)$ baltos šviesos spektrinė sudėtis. Vadinasi, baltos spalvos vektorius sutampa su $x_i(\lambda)$ ašimi. Iš čia išplaukia, kad pradines ašis reikia pasukti (tai atlieka operatorius A_2) taip, kad ašies x_i ir baltos spalvos vektorių kryptys sutaptų. Tokį ortogonalų pakeitimą nesunku rasti. Tačiau naujas operatorius $\Omega_2 = A_1A_2$ irgi įvairiai apibūdina ieškomą transformaciją, nes bet koks posūkis aplink ašį x_1 nekeičia dydžio η . Norėdami surasti likusį posūkį, t. y. operatorių A_3 , pasinaudosime dar viena papildoma sąlyga, – atliksime dar vieną posūkį apie ašį x_1 . Ašis x_2 ir x_3 orientuosime taip, kad jų kryptys sutaptų su vektorių, nusakančių „konstantinių tonų“ spalvą, kryptimis. Tai bus vektoriai, atitinkantys monochromatinę $\lambda = 475, 500$ ir 580 nm bangos ilgio šviesą [11, 12]. Žinodami, kad „konstantiniai tonai“ yra rasti empiriniu būdu ir tik tam tikru tikslumu, ieškosime ortogonalios transformacijos, kurią įvykdžius kampų tarp minėtų vektorių ir plokštumų $\{x_1, x_2, 0\}$, $\{x_1, 0, x\}$ suma būtų mažiausia.

Atlikus minėtus pakeitimus, operatorius $\Omega_2 = A_1A_2A_3$ užrašomas taip:

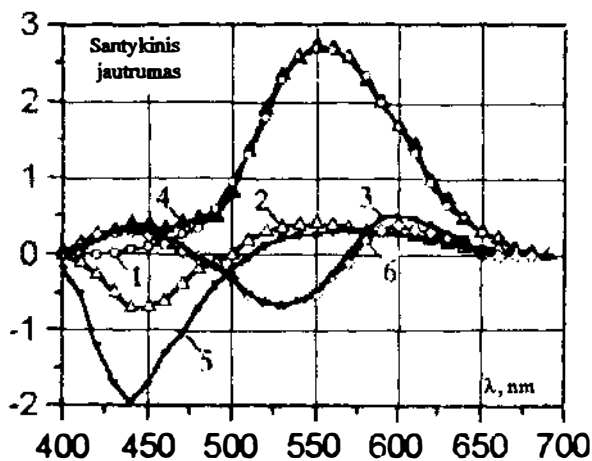
$$\begin{pmatrix} 0.7 & 0.58 & 0.38 \\ 0.44 & 0.08 & -0.9 \\ 0.55 & -0.8 & 0.24 \end{pmatrix} \text{ ir } \begin{pmatrix} 0.81 & 0.56 & 0.11 \\ 0.19 & -0.04 & -0.98 \\ 0.54 & -0.83 & 0.17 \end{pmatrix}$$

Pirmoji matrica atitinka atvejį, kai veikia D_{65} tipo baltos šviesos šaltinis, o antroji – kai veikia A tipo baltos šviesos šaltinis.

1 ir 2 pav. pateiktos oponentinės funkcijos, apskaičiuotos naudojantis pirmąja ir antrąja matricomis. Reikia pripažinti, kad oponentinės funkcijos, maksimizuojančios santykio η dydį, nebuvo normuojamos, todėl atliekant minėtus posūkius, buvo nežymiai pažeistas jų ortogonalumas.



1 pav. Oponentinės spektrinio jautrumo funkcijos, kai veikia D₆₅ tipo baltos šviesos šaltinis (1, 2, 3 – eksperimentinės, naudojant tris skirtingas eksperimentines oponentines funkcijas [9]; 4, 5, 6 – teorinės, apskaičiuotos naudojant tris skirtingas teorines oponentines funkcijas)



2 pav. Oponentinės spektrinio jautrumo funkcijos, kai veikia A tipo baltos šviesos šaltinis (1, 2, 3 – eksperimentinės, išmatuotos naudojant tris skirtingas eksperimentines oponentines funkcijas; 4, 5, 6 – teorinės, apskaičiuotos naudojant tris skirtingas teorines oponentines funkcijas)

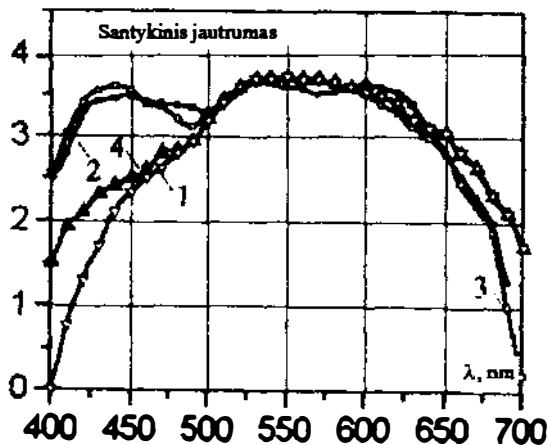
2. PAGRINDINĖS MODELIO SAVYBĖS

Skaičiuodami „psichofizikines“ modelio savybes“, kaip ir darbų [6,7,9,13] autoriai, darysime šias prielaidas:

- stimulo ryškumas išreiškiamas jį atitinkančio vektoriaus modulio dydžiu;
- spalvinis tonas apibūdinamas dvimačio vektoriaus, kuris yra spalvos vektoriaus projekcija į plokštumą (x_2, x_3) , orientacija;
- spalvos sodrumas išreiškiamas tiesiogiai kampo tarp baltos šviesos ir analizuojamos spalvos vektorių dydžiu (kampas didesnis – spalva sodresnė).

Buvo įvertinta spalvos ryškumo priklausomybė $M(\lambda) = [X_1^2 + X_2^2 + X_3^2]^{1/2}$

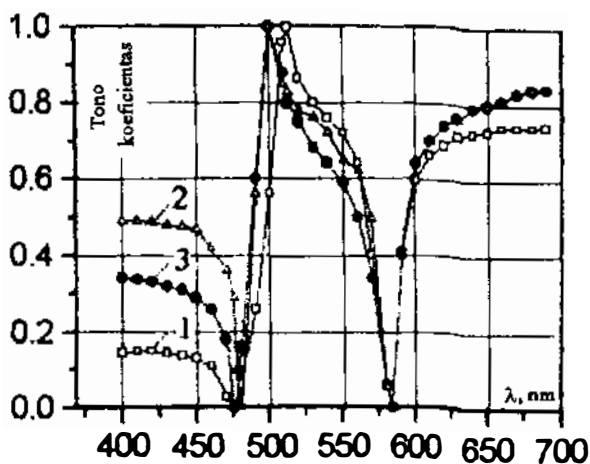
nuo monochromatinės šviesos bangos ilgio. Ši priklausomybė, kartu su eksperimentine, vadinamąja spektrinio jautrumo charakteristika, parodytos 3 pav. Pastarosios charakteristikos pobūdis priklauso nuo eksperimento sąlygų (stimulo dinaminių savybių, jo dydžio bei padėties matymo lauke) [14, 15]. Dažniausiai naudojama vadinamoji slenkstinė spektrinio matymo charakteristika (3 pav.), kuri žymiai skiriasi nuo charakteristikos $V(\lambda)$. Šio neatitikimo priežastys nėra aiškios.



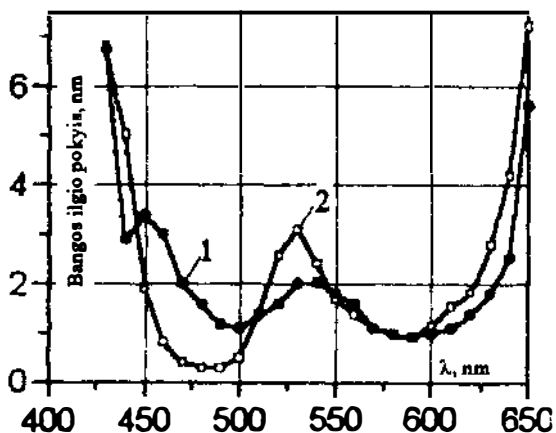
3 pav. Achromatinės spektrinio jautrumo funkcijos (1 – įprastinė CIE žmogaus achromatinio spektrinio jautrumo funkcija; 2 – spektrinio jautrumo funkcija [14]; 3 – teorinė funkcija; 4 – teorinė funkcija, apskaičiuota, kai B-kūgelių jautrumas mažas).

Jau buvo minėta, kad spalvinis tonas yra išreiškiamas spalvos vektoriaus projekcijos orientacija plokštumoje (x_2, x_3) . Tačiau literatūroje nepavyko surasti analogiškų žmogaus regos charakteristikų. Dažniausiai tam yra taikomi vadinamieji tono koeficientai, kurie yra išreiškiami santykiniais dydžiais $|x_3|/(|x_2|+|x_3|)$ arba $|x_2|/(|x_2|+|x_3|)$. Šios teorinės priklausomybės apskaičiuotos įvairiems baltos šviesos šaltiniams kaip funkcijos $x_i(\lambda)$, pavaizduotos 4 pav.: kreivė A – kai buvo naudojamas A tipo baltos šviesos šaltinis; kreivė B – kai buvo naudojamas D₆₅ tipo šaltinis. Šiame pačiame paveiksle yra pavaizduota ir analogiška, empirinė žmogaus suvokiamo tono priklausomybė nuo monochromatinės šviesos bangos ilgio [12].

Charakteristika, kuri apibūdina, kaip priklauso žmogaus vos pastebimi (slenkstiniai) stimulo bangos ilgio pokyčiai ($\Delta\lambda$) nuo šviesos bangos ilgio, pateikta 5 pav. [16]. Abscisių ašyje atidėta vienodo ryškumo monochromatinės šviesos bangos ilgis λ , o ordinačių ašyje – vos pastebimas (slenkstinis) bangos ilgio pokytis $\Delta\lambda$.



4 pav. Tono koeficientų priklausomybė nuo bangos ilgio (1, 2 – teorinės priklausomybės, kai veikia A arba D₆₅ tipo baltos šviesos šaltinis; 3 – eksperimentinė priklausomybė [12])



5 pav. Slenkstinio bangos ilgio priklausomybė nuo bangos ilgio pokyčio (1 – eksperimentinė; 2 – teorinė [16])

Skaiciuojant analogišką modelio charakteristiką, buvo ieškomas toks bangos ilgio pokytis, kuriam esant spalvos vektoriaus orientacija pasikeičia slenkstiniu dydžiu $\Delta\Psi$. Buvo daroma prielaida, kad šis dydis pastovus ir jį apskaičiuodavome iš literatūroje pateiktų eksperimentinių duomenų [16]. Nustatėme mažiausias slenkstines $\Delta\lambda$ vertes, esant monochromatinės šviesos bangos ilgiams $\lambda = 490, 530$ ir 590 nm. Žinodami dydį $\Delta\lambda$, apskaičiuavome, kokius kampus tarp spalvinių vektorių atitinka šis bangos pokytis, t. y. apskaičiuavome $\Delta\Psi_{490}, \Delta\Psi_{530}$ ir $\Delta\Psi_{590}$ reikšmes.

Padarius prielaidą, kad slenkstinio kampo reikšmė yra pastovi ir lygi $\Delta\Psi = (\Delta\Psi_{490} + \Delta\Psi_{530} + \Delta\Psi_{590})/3$ ir žinant dydžio $\Delta\Psi$ vertę, iš formulės

$$\cos \Delta\Psi = \sum_1^3 X_i(\lambda) X_i(\lambda + \Delta\lambda) / \left\{ \left[\sum_i^3 X_i^2(\lambda) \right] \left[\sum_i^3 X_i^2(\lambda + \Delta\lambda) \right] \right\}^{1/2},$$

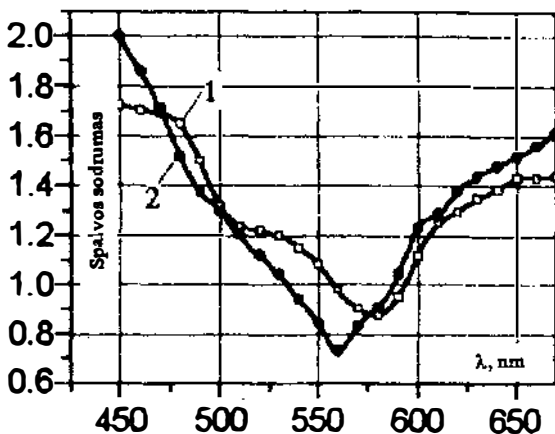
skaičiuoti bangos ilgio slenkstinį pokytį $\Delta\lambda(\lambda)$. Šiuo būdu rasta priklausomybė pateikta 5 pav.

Atliekant eksperimentus, spalvos sodrumas dažniausiai išreiškiamas logaritmiu dydžiu $\log[(L_w - L)/L]$: čia L_w – baltos šviesos intensyvumas; L – toks tiriamos monochromatinės šviesos intensyvumas, kuriam veikiant kartu su balta šviesa gaunamas vos pastebimas spalvos sodrumo pokytis, kai jos ryškumas išlaikomas pastovus. Modelio schemoje toks mo-

nochromatinės šviesos priedas reiškia, kad, jam veikiant, spalvos vektorius pasisuka slenkstiniu kampu $\Delta\Psi$. Teoretiškai apskaičiuota priklausomybė, pavaizduota 6 pav. Tame pačiame paveiksle pateiktos ir eksperimentinės priklausomybės, aprašytos darbe [17].

3. REZULTATŲ SVARSTYMAS

Jau buvo minėta, kad keičiant receptorinius signalus į oponentinius, gali padidėti receptorių išėjimuose veikiančio triukšmo įtaka. Pavyzdžiui, [2] darbe ieškomas toks operatorius, kuris garantuotų signalų dekoreliaciją ir padidintų perduodamo optinio signalo patikimumą. Čia patikimumo sąvoka suprantama kaip sistemos sugebėjimas perduoti nors juodai baltą vaizdą, kai nedirba vienas arba du oponentiniai kanalai. Taip pat parodyta, kad tokios sistemos ir žmogaus regos analizatoriaus savybės skiriasi. Apskaičiavę santykį η taip pat nustatėme, kad, atlikus [2] darbe siūlomą transformaciją, šis dydis, lyginant su sistema, kurioje receptorinio signalo transformacija nevykdoma, sumažėjo dviem eilėmis. Naudojant čia pateikiamas funkcijas, dydis η padidėja beveik dvigubai. Šis santykis taip pat buvo apskaičiuotas naudojant oponentines funkcijas, nurodytas darbe [18]. Nustatyta, kad šis santykis irgi padidėja, kai oponentinės funkcijos atitinka viršslenkstinį spalvinį regėjimą. Kai kalbama apie slenkstinį regėjimą (t. y. spalvinio regėjimo nėra) ir naudojama darbe [2] siūloma transformacija, santykis irgi sumažėja dviem eilėmis.



6 pav. Sodrumo skyrimo funkcija (1–teorinė; 2–eksperimentinė, kai veikia A tipo baltos šviesos šaltinis [17])

Pav. 1 ir 2 pavaizduotos nagrinėto modelio ir darbe [9] pateiktos oponentinės funkcijos. Matyti, kad vidutinių ir ilgų bangų srityse abi funkcijos, išreiškiančios achromatinio kanalo išėjimo signalo priklausomybę nuo monochromatinės šviesos bangos ilgio, yra labai artimos. Didesnis skirtumas yra trumpabangėje srityje. Tačiau reikėtų įvertinti ir tai, kad šioje spektro srityje eksperimentiniai įvairių autorių rezultatai labai prieštarin-gi: priklausomai nuo taikomos metodikos rezultatai čia gali skirtis dešim-timis kartų [13, 19].

Jau minėta, kad modelyje stimulo ryškumas buvo vertinamas spalvos vektoriaus moduliui, t. y. buvo apskaičiuojamas dydis $M(\lambda)$. Kyla klausimas, kokios funkcijų $M(\lambda)$ ir $V(\lambda)$, aprašančių ryškumo priklausomybę nuo monochromatinės šviesos bangos ilgio, nesutapimo priežastys. Kadangi achromatinio kanalo spektrinė charakteristika labai artima vadina-majai spektrinei jautrumo kreivei $V(\lambda)$, tai daroma išvada, kad achromati-nio kanalo signalas nulemia suvokiamą šviesos ryškumą, o du likę oponentiniai kanalai perduoda informaciją apie šviesos spalvingumą. Tačiau, remiantis tokia koncepcija, atsiranda sunkumų aiškinti dviejų stimulu ryšku-mo sumos neadityvumo reiškinį [20]. Šio reiškinio esmė yra tai, kad dviejų vienu metu veikiančių stimulu atstojamasis ryškumas nėra lygus šių stimu-lų ryškumų sumai. Sunkumų galima išvengti, padarius prielaidą, kad vienu metu toje pačioje tinklainės vietoje, veikiant dviems stimulams, juos atsto-jančio stimulo ryškumas savo skaitine reikšme yra lygus spalvos vektoriaus moduliui, o ne vienai kuriai nors jo dedamajai. Atstojamasis spalvos vek-torius lygus dviejų vektorių, kurių kiekvienas atitinka vieną iš minėtų sti-mulų spalvą, sumai. Būtent šia prielaida ir buvo remtasi skaičiuojant ryš-kumo charakteristikas. Tačiau kai kada priklausomai nuo eksperimento sąlygų gali būti labai susilpnėjęs kurio nors vieno receptoriaus poveikis. Pavyzdžiui, tarkime, kad, stimului mirksint didesniu dažniu, mėlynų kūge-lių (B–kūgelių) signalas labai sumažėja. Šiuo atveju skaičiuojant spalvos vektoriaus komponentes arba oponentinių funkcijų reikšmes, mėlyno kū-gelio signalo nereikia vertinti. Skaičiavimai parodė, kad šiuo atveju, kai mėlynų kūgelių signalai artimi nuliui, priklausomybė $M(\lambda)$ tampa labai panaši į priklausomybę $V(\lambda)$ (žr. 3 pav.). Tai, kad spektrinio jautrumo charakteristikos pobūdis priklauso nuo B–kūgelių efektyvumo, matyti ir iš eksperimentinių duomenų: kai mažų matmenų stimulai, projektuojami į fovealiają tinklainės sritį, kur B–kūgelių nėra [14], tuomet $M(\lambda)$ charkate-ristika redukuojasi į $V(\lambda)$ charakteristiką. Stimulo matmenims didėjant, jautrumo kreivė vėl pamažu panašėja į $M(\lambda)$ charakteristikos pobūdį. Be

to, tokių mirksinčių stimulių, kuriems spektrinė jautrumo funkcija yra panaši į $V(\lambda)$, ryškumo adityvumas irgi yra išlaikomas. Modelio skaičiavimai parodė, kad, išjungus B–kūgelius, ryškumo adityvumas irgi išlaikomas – maksimalus nukrypimas neviršija 10%.

Lyginant kitas analogiškas modelio ir žmogaus charakteristikas, nustatyta, kad jos labiausiai skiriasi trumpabangėje spektro dalyje. Tačiau reikia atsižvelgti į tai, kad šioje srityje eksperimento tikslumas yra žemas. Norint išsiaiškinti šio neatitikimo priežastis, reikėtų, įvertinus įvairius galimus neuroninio tinklo triukšmus, atlikti papildomus eksperimentus su žmogumi ir su modeliu.

IŠVADOS

1. Pateikta regos sistemos modelio oponentinių funkcijų skaičiavimo metodika, įvertinanti receptorių, oponentinių ląstelių ir kitų neuroninio tinklo elementų triukšmus ir garantuojant maksimalią sistemos spalvų skiriamąją gebą.

2. Pateikto modelio funkcinės charakteristikos praktiškai sutampa su analogiškomis žmogaus bei gyvūnų regos sistemos charakteristikomis.

3. Siūloma oponentines funkcijas skaičiuoti atsižvelgiant į spalvinės informacijos funkcinę reikšmę gyvam organizmui.

L i t e r a t ū r a

1. Vaitkevičius H. H., Dailydaite R., Meskauskas A., Sinius J. Opponent processing in the color analyzer and it's connection with differential sensitivity // Symposium: computational models of hearing and vision. Summaries. Tallinn. 1984.

2. Buchsbaum G., Gottshalk Trichromacy opponent colours coding and optimum colour information transmission in the retina // Proc. Roy. Soc. London. 1983. V 220. P. 89–113.

3. Соколов Е. Н., Вайткявичюс Г. Г. Нейроинтелект // М., 1989, 219 с.

4. Vos J. J., Walraven P. L. On the derivation of the foveal receptor primaries // Vision Res. 1971. V. 11. P. 799–818.

5. Smith V. C., Pokorny J. Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments // Vision Res. 1972. V. 12. P. 2059–2071.

6. Svaetichin G., Negishi K., Faterchand R. Cellular mechanisms of Young–Hering color theory // CIBA Found. Symp. Color Vision. Little, Brown & Co. Boston, 1965, P. 178–202.

7. Paramej G.V., Ismailov Ch. A., Sokolov E. N. Multidimensional scalling of large chromatic differences by normal and color-deficiency subjects // *Psychol. Sci.* 1991. June 4. P. 244-248.

8. Ismailov Ch. A., Sokolov E. N. Spherical model of color and brightness discrimination // *Psychol. Sci.* 1991. June 4. P. 249-259.

9. Boynton R. M. Color vision // *Ann. Rev. Psychol.* 1988. V. 39. P. 69-100.

10. Smith V. C., Pokorny J. Spectral sensitivity of the foveal cone pigments between 400 and 500 nm // *Vision Res.* 1975. V. 15. P. 161-171.

11. Purdy D. M. Spectral hue as function of intensity. // *Amer. J. Psychol.* 1931. V. 43. P. 541-559.

12. Hurvich L. M., Jameson D. Some quantitative aspects of an opponent-color theory: brightness, saturation and hue in normal and dichromatic vision. // *J. Opt. Soc. Am.* 1955. V. 45. P. 602-616.

13. Elzinga C., de Weert Ch. Nonlinear codes for the yellow/blue mechanisms. // *Vision Res.* 1984, V. 24. P. 911-922.

14. Kulikowski J. J., Walsh V. On the limits of colour detection and discrimination. // *Vision and visual dysfunction. V.5: Limits of vision.* Macmillan Press, London. 1991, p.

15. Kaiser P. K. Flicker as function of wavelength and heterochromatic flicker photometry. // *Vision and visual dysfunction. V.5. Limits of vision.* Macmillan Press. 1991. P. 171-189.

16. Wright W. D., Pitt F.M. S. Hue discrimination in normal color vision. // *Proc. Phys. Soc. London.* 1934, V. 46. P. 459.

17. Wright W. D. Research on normal and defective colour vision. Henry Kimpton. London. 1946.

18. Ingling C. R., Tsou B. M. Orthogonal combinations of three visual channels. // *Vision Res.* 1977. V. 17. P. 1075-1082.

19. Ingling C. R., Russell P. W., Rea M. S., Tsou B. H. Red-green opponent spectral sensitivity; disparity between cancellation and direct matching methods. // *Science* 1978. V. 201. p. 1221-1223.

20. Guth S. L., Donkey N. J., Marroco R. T. On luminance additivity and related topics. // *Vision Res.* 1969, V. 9. P. 537-575.

The opponent colour functions and their relations with the colour discriminability

H. Vaitkevičius, Z. Bliznikas, Ž. Stankevičius

Abstract

The paper deals with the problem of a construction of opponent functions, which stem from the linear summation of three receptor (R, G, B) signals. It is considered two stages model: stage of the receptors and stage of the opponent cells. Each stage has the own intrinsic independent generators of noise. The co-

lor is determined by the point in three-dimensional space with coordinates $\{x_i\}$, $(i=1,2,3)$, where x_i is value of the output signals of the opponent cells. Let V be the volume of „colour body“ and s be the volume of sphere, where an end of a color vector is located with a given probability p_0 . Then a ratio V/s characterizes a colour discriminability: the greater ratio V/s the greater discriminability of the system. It is looking for such transformation of receptor signals into opponent those (i.e. searching a linear operator A), that the ratio V/s would be maximal. The properties of the proposed model were investigated. They fit well to the properties obtained in traditional psychophysic experiments: opponent colour functions, hue coefficients, wavelength and saturation discrimination, achromatic channel sensitivity, non-additivity of brightness. This led to conclusion that the possible role of the colour opponency is ensuring optimal colour discriminability in human vision.