

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО НЕВРОБИОЛОГИЯ

Биляна Захариева Генова

**ВРЕМЕ НА РЕАКЦИЯ КЪМ ПРОМЕНИ НА
ЗРИТЕЛНО ДВИЖЕНИЕ У ЧОВЕКА**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за присъждане на образователната и научна степен
“доктор”**

**Научен ръководител:
проф. Стефан Матеев, дн**

**Рецензенти:
проф. Ангел Василев, дн
проф. Божидар Димитров, дн**

**София
2011**

Дисертационният труд е написан на 178 стандартни машинописни страници и е онагледен с 30 фигури и 2 таблици. Библиографията включва 209 заглавия, от които 2 са на кирилица и 207 са на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2011 г.
от часа в залата на ,
бл. . . . на БАН. Материалите по защитата са на разположение в
канцеларията на Института по невробиология, ул. Акад. Г. Бончев,
бл. 23.

ВЪВЕДЕНИЕ

Околната среда непрекъснато ни поставя задачи за максимално бърза реакция. Зрителното ни обкръжение е изключително динамично: обектите се движат и често променят посоката и скоростта си на движение. Колко бързо наблюдателят може да установи наличието на зрително движение или неговата промяна, и колко бързо той може да вземе решение и да реагира на обстановката? Емпиричният отговор на този въпрос може да се даде от измервания на времето на реакция; то протича от момента на началото на движението или на неговата промяна до момента, в който се предприема необходимото действие.

Известно е, че по-силните стимули водят до по-късо време на реакция. Зависимостта на времето на реакция RT от “силата”, или “интензитета”, на стимула S се апроксимира добре с функцията на Piéron:

$$RT = CS^n + SRT_0 \quad (1)$$

където $C > 0$, $n < 0$ и $SRT_0 > 0$ са константи. Определянето на “интензитета” на стимула е сравнително лесно при представяне на прости физически стимули, чиято сила може да се определи в енергетически единици. При по-комплицирани стимули, например начало на движение или промяна на движението по скорост и/или по посока, дефинирането на “интензитета” във функцията на Пиерон не е толкова просто. Интензитетът на стимула не се мени при тези обстоятелства, но въпреки това, данните показват ясна зависимост от кинематичните (не от енергетичните) параметри на стимулацията.

Дефинирането на “силата” на подвижни стимули е сравнително просто при задача за проста реакция към начало на движение – силата на стимула се определя от самата скорост на движението. По-сложен е случая, когато се реагира на промяна на големината на скоростта от V_1 към V_2 . Тогава, както показват Dzhafarov, Sekuler & Allik (1993) в модела си, силата на стимула се определя от абсолютната стойност на разликата между скоростите преди и след промяната, $|V_2 - V_1|$:

$$SRT = C|V_2 - V_1|^n + SRT_0 \quad (2)$$

Моделът на Dzhafarov et al. (1993) и уравнение (2) описва и обяснява данните само за време на проста реакция и само към едномерни промени на движението. Време на реакция на избор към промени на посоката на движение досега не е било изследвано. Така се очертава въпросът за разширяване на модела на Dzhafarov et al. (1993) за

двумерни промени и обосноваване на подходяща метрика за описание освен на времето на проста реакция, също и на времето на реакция на избор като функция на параметрите на представената стимулация.

При измерването на време на реакция стимулите се представят последователно в проби, и от наблюдателя се изисква да даде колкото се може по-бързо предварително определен отговор. Предполага се, че времето на реакция зависи от броя на менталните операции, които се извършват по време на изпълнение на задачата и от времето, от което се нуждае всяка от тези операции. Съгласно класическата представа (Donders, 1868) най-бързо протича простата реакция на стимула; тя включва операциите: откриване на стимула и изпълнение на отговора. Задачата за време на реакция на избор включва етапите: откриване на стимула; различаване на стимула; избор на отговор; и изпълнение на отговора. Основни допускания са, че етапите настъпват последователно във времето и, че времетраенето на един етап може да се оцени като разликата между времената на реакция в задача, която включва този етап и задача, в която този етап отсъства (като стимулацията остава една и съща и при двете задачи).

Предположението за последователност на етапите при изпълнение на бърз отговор води до следните разсъждения. Простата реакция се очаква да е по-бърза от реакцията на избор, тъй като последната включва два етапа, или операции в повече – това са “различаване на стимула” и “избор на отговор”. Ако допуснем, че изпълнението на отговор ще изисква едно и също време и при двете задачи и, че приносът на етапа “избор на отговор” към общото време на реакция ще е незначителен в условията на само две алтернативи за отговор, основното различие между времената на проста реакция и реакция на избор ще се дължи на операцията “различаване на стимула”, която би следвало да се извършва само при изпълнението на реакцията на избор.

Вероятно откриването на промяната на движението се извършва от т.нар. монополярен механизъм, който може да открие промяната, но не може да установи нейния знак. Различаването на знака на промяната вероятно се извършва от т.нар. биполярен механизъм, който може да определи знака на промяната. Работата е там, че биполярният механизъм може да изпълни функциите на монополярния, но не и обратното. Това разсъждение може да постави под съмнение допускането за последователност на етапите „откриване” и „различаване” в схемата на Donders и очертава въпроса дали етапите на откриване и различаване на стимулите при

изпълнението на простата реакция и реакцията на избор на промени на зрителното движение се осъществяват от еднакви или различни механизми.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Изследванията ни на времето на реакция към промени на зрително движение преследват три основни цели:

1. Да се намери параметър на зрителната стимулация, който адекватно да описва и обяснява данни за времена на реакция, измерени при изпълнение на задачи за реакция на избор и проста реакция на промени не само на скоростта, но и на посоката на зрително движение;

2. Да се определят механизмите на откриване и различаване и последователността на тяхното функциониране във времето при изпълнение на задачи за реакция на избор и проста реакция на промени на скоростта и посоката на зрително движение;

3. Да се опишат и обяснят в рамките на единен теоретичен модел данните за времена на проста реакция и на реакция при избор към промени на скоростта и посоката на зрително движение.

За да се осъществят така формулираните цели, е необходимо да се изпълнят следните експериментални задачи:

1. Да се измери простото време на реакция като функция от ъгъла на промяна на посоката на движение, без да се променя големината на скоростта му;

2. Да се измери времето на реакция на избор като функция от ъгъла на промяна на посоката на движение, без да се мени големината на скоростта му;

3. Да се установи ролята на началната скорост на движение върху времената на реакция при задачи за проста реакция и реакция на избор;

4. Да се измери простото време на реакция като функция на ъгъла на промяната и едновременно с това на големината на промяната на скоростта;

5. Да се измери времето на реакция на избор като функция на ъгъла на промяната и едновременно с това на големината на промяната на скоростта.

МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Апаратура и метод на прожекция на стимулите

Изследванията се провеждаха с помощта на конфигурация от случайно разпределени светли точки, които се движеха на тъмен фон в рамките на невидима за наблюдателя апертура. Всички точки се движеха с една и съща скорост и посока, при промяна на движението съответно се променяше скоростта, посоката (или и двете заедно) на цялата конфигурация. Конфигурацията от точки се прожектираше чрез поставени зад екран осцилоскоп и решето със случайно разпределени отвори. Изследваните лица седяха на разстояние 30 cm пред равномерно осветен бял екран с яркост 0.6 cd/m^2 . Те фиксираха бинокулярно точка, намираща се право пред тях. Конфигурацията от точки се представяше в кръгла апертура с диаметър 10 ъгл. град, която беше разположена на 4 ъгл. град от фиксационната точка. Конфигурацията беше с гъстота средно 1.4 точки на cm^2 ; всяка точка - с диаметър около 0.75 ъгл. град и с яркост 2.4 cd/m^2 ; Майкелсоновият контраст на точките беше 0.6. Движението на точките се управляваше от компютър. Напрежението от два 16-битови цифрово-аналогови преобразуватели се подаваше на X- и Y- входовете на осцилоскопа. Движението на конфигурацията от точки на 1 град. зрителен ъгъл от екрана беше дискретизирано на 1500 стъпки като всяка нова позиция на лъча се пресмъщаваше на всеки 0.1 msec. По този начин се представяше практически гладко движение. Времената на реакция се измерваха с външен таймер, свързан с външни бутони за реагиране.

Психофизични методи и процедури

Процедура на измерването на времето на реакция. Времето на проста реакция се измерваше по следния начин. След предупредителен звуков сигнал конфигурацията от точки се появяваше на екрана и започваше да се движи. След случайно избрано между 1 и 2 сек време движението се променяше по посока, по скорост, или едновременно по скорост и посока. Изследваното лице имаше за задача възможно най-бързо след като види промяна да натиска винаги с един и същ пръст и един и същ бутон.

При измерване на времето на реакция на избор на изследваното лице се представяха две равностойни алтернативи, например промяна на посоката наляво и надясно от вертикалата, като ъгълът на отклонение е един и същ. Алтернативите се представяха равновероятно в последователните проби. То имаше за задача да

натиска ляв бутон с пръст на лявата ръка при промяна на посоката наляво, и десен бутон с пръст на дясната ръка при промяна надясно.

Измерване на времеви праг. При измерването на времеви праг за откриване във всяка проба се представяха в случаен ред равномерно движение и движение с промяна на посоката. Изследваното лице трябваше да отговори в кой от двата интервала на пробата е движението с промяна на посоката, като натискаше един от два бутона. При задача за различаване и в двата интервала се представяше движение с промяна на посоката като в единия интервал промяната беше наляво, и в другия – надясно. Задачата на изследваното лице беше да посочи в кой от двата интервала беше представено отклонението наляво като натискаше един от два бутона. Времетраенето на движението с промяна се варираше и при двете задачи като се прилагаше адаптивен метод (т.нар. “трансформиран Up-Down метод” на Levitt), съгласно който след всеки неправилен отговор времетраенето на движението с промяна се увеличаваше и след всеки 4 последователни правилни отговора то се намаляваше.

Изследвани лица. В експериментите участваха общо 22 изследвани лица с нормално или коригирано към нормално зрение. Повечето от лицата (20) бяха наивни по отношение на целите на експериментите. Някои от лицата участваха в повече от един експеримент.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

1. Събиране на емпирични данни, от които да се изведе метрика за времената на реакция при промени на посоката и скоростта на движение

В Експеримент 1 се изследваше простата реакция на промяна на посоката на движение при постоянна скорост. Конфигурацията от точки се движеше в хоризонтално направление със скорост V_1 за време случайно избрано между 1 и 2 сек. След това посоката на движение внезапно се променяше на ъгъл α , измерван обратно на часовниковата стрелка от посоката $3h$. Представяха се ъгли на промяна на посоката: 6° , 12° , 23° , 45° , 70° , 105° и 180° и две базови скорости: 4 и 12 ъгл.град/сек. В опита взеха участие 5 изследвани лица.

В Експеримент 2 се изследваше простата реакция на комплексни промени на движението - едновременно по скорост и по

посока. Конфигурацията от точки се движеше във вертикално направление за време случайно избрано между 1 и 1.8 сек. След това посоката на движение внезапно се променяше надясно под ъгъл α за 0.9 сек. За да се избегнат ефекти от адаптация и послеефект от движението, посоката на вектора V_1 се редуваше алтернативно нагоре и надолу, като векторите след промяната V_2 бяха насочени винаги надясно. Представяха се две начални скорости V_1 : 4 и 8 ъгл. град/сек и три ъгъла α на промяна на посоката: 20° , 60° и 120° . Използваха се шест скорости V_2 на движението след промяната, като при $V_1 = 4$ ъгл.град/сек те бяха: 1, 2, 3, 4, 5 и 6 ъгл. град/сек, а при $V_1 = 8$ ъгл. град/сек - 2, 4, 6, 8, 10 и 12 ъгл. град/сек. Изследваното лице изпълняваше задача за проста реакция като натискаше един и същ бутон винаги с един и същ пръст, веднага след като открие каквато и да е промяна на движението – по скорост, по посока или и по двата признака. В Експеримент 2 взеха участие 7 изследвани лица.

В Експеримент 3 се проверяваше на ролята на дирекционална анизотропия на зрителното поле върху времето на проста реакция. Конфигурацията от точки стоеше неподвижно на екрана за време случайно избрано между 1 и 1.8 сек. След това започваше да се движи надясно под ъгли 20° , 60° , 120° и 160° спрямо вертикалата. Тези посоки са същите, в които беше движението след промяната в Експеримент 2. Представяха се 3 скорости: 1, 3 и 5 град/сек. Изследваното лице трябваше да натиска един и същ бутон с един и същ пръст възможно най-бързо, веднага щом види началото на движението. Взеха участие 6 лица.

В Експеримент 4 се измерваше времето на реакция на избор към промени на движението по скорост и по посока. Конфигурацията от точки се движеше вертикално за време 1.4 сек. След това посоката на движение внезапно се променяше случайно, наляво или надясно на ъгъл α за 0.9 сек. Посоката на вектора V_1 алтернативно се редуваше нагоре и надолу. Представяха се две начални скорости, $V_1 = 4$ и 8 ъгл. град/сек. При $V_1 = 4$ ъгл. град/сек скоростите след промяната бяха $V_2 = 2$ и 6 ъгл. град/сек. При $V_1 = 8$ ъгл. град/сек, скоростите след промяната V_2 бяха 4 и 12 ъгл. град/сек. Посоките на движение се променяха под два ъгъла: 20° и 80° . Изследваното лице имаше за задача възможно най-бързо да натисне ляв бутон с лявата ръка, ако движението се е отклонило наляво, и десен бутон с дясната ръка, ако движението се е отклонило надясно. В Експеримент 4 участваха 6 изследвани лица.

В Експеримент 5 се изследваше времето на реакция на избор към начало на движение в различни посоки. Представяха се същите

посоки и скорости както посоките и скоростите след промяната в Експеримент 4, като отсъстваше началното движение. Изследваното лице натискаше ляв бутон когато движението беше наляво от вертикалата и десен бутон когато движението беше надясно от нея. В опита взеха участие същите 6 лица от предишния Експеримент 4.

2. Откриване и различаване на промени: различни механизми или общ механизъм? Събиране на емпирични данни за решаване на въпроса

В Експеримент 6 се изследваше времето на проста реакция към алтернативни промени на посоката при постоянна скорост на движение. Конфигурацията от точки се движеше нагоре във вертикална посока със скорост V за време, случайно избрано между 1 и 2 сек. След това посоката на движение внезапно се променяше на ъгъл α наляво или надясно. Изследваното лице трябваше да натиска бутон винаги с един и същ пръст колкото е възможно по-бързо след като види промяната, без значение тя дали е наляво или надясно. Представяха се седем ъгъла α на промяна: 11° , 22° , 56° , 90° , 124° , 158° и 169° и две базови скорости V : 4 и 12 ъгл. град/сек. В експеримента участваха 5 лица.

В Експеримент 7 се изследваше реакцията на избор при промени на посоката на движение при постоянна скорост. Този експеримент беше проведен със същите стимули и процедура, с които бе проведен предишния експеримент. Изследваното лице изпълняваше задача за реакция при избор: то натискаше ляв бутон с лява ръка, ако промяната на посоката е била наляво, и десен бутон с дясна ръка, ако движението се е отклонило надясно. Участваха същите лица от предишния Експеримент 6.

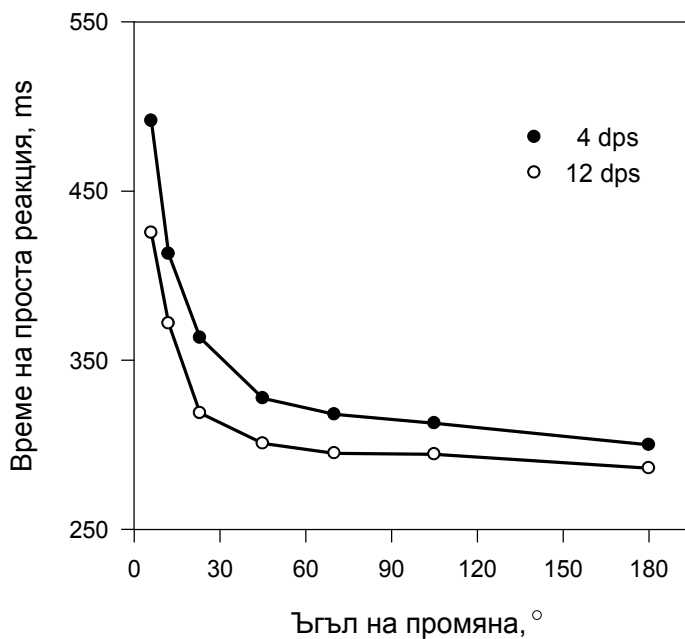
В Експеримент 8 се изследваше разликата между времето на проста реакция и времето на реакция на избор при малки промени на посоката на движение. Представяха се стимулите, които се състоят от промяна на посоката на ъгъл 11° при двете базови скорости 4 и 12 ъгл.град/сек. Шест нови изследвани лица участваха в експеримента като в една и съща сесия се редуваха задача за проста реакция и задача за реакция при избор.

В Експеримент 9 се изследваше праговото времетраене за откриване и различаване на най-малката и най-голямата промени на посоката, представяни в предишните експерименти, т.е. промени на посоката на ъгли $\alpha = 11^\circ$ и 169° при двете базови скорости 4 и 12 ъгл.град/сек. В експеримента взеха участие 5 лица.

РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

1. Метрика за описание на времето на проста реакция към промени на посоката на зрително движение при постоянна скорост

В Експеримент 1 получихме, че времето на проста реакция към промяна на посоката на движение при постоянна скорост монотонно намалява с увеличаване ъгъла α на промяната и се скъсява с увеличаване на базовата скорост (фиг. 1).



Фигура 1. Данни от Експеримент 1 за време на проста реакция. Нанесени са осреднените стойности по пет изследвани лица. Времето на проста реакция е монотонно намаляваща функция от ъгъла на промяна на посоката. Стандартната грешка е между 7 msec (при промяна на ъгъл 180°) и 21 msec (при промяна на ъгъл 6°)

Като първоначален опит за апроксимация на данните от Експеримент 1 приложихме равенство (3) във векторен вид:

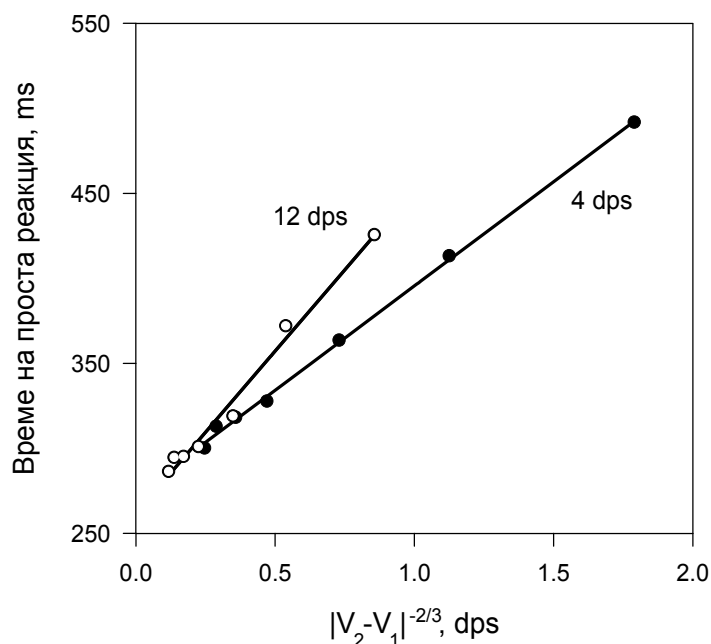
$$SRT = C|V_2 - V_1|^n + SRT_0 \quad (3)$$

Големината на векторната разлика $|V_2 - V_1|$ може да се изчисли по косинусовата теорема приложена за триъгълника образуван от векторите V_1 , V_2 и $V_2 - V_1$, като след тригонометрични преобразувания се получава, че

$$|V_2 - V_1| = 2V \sin(\alpha/2), \quad \text{при } |V_1| = |V_2| = V$$

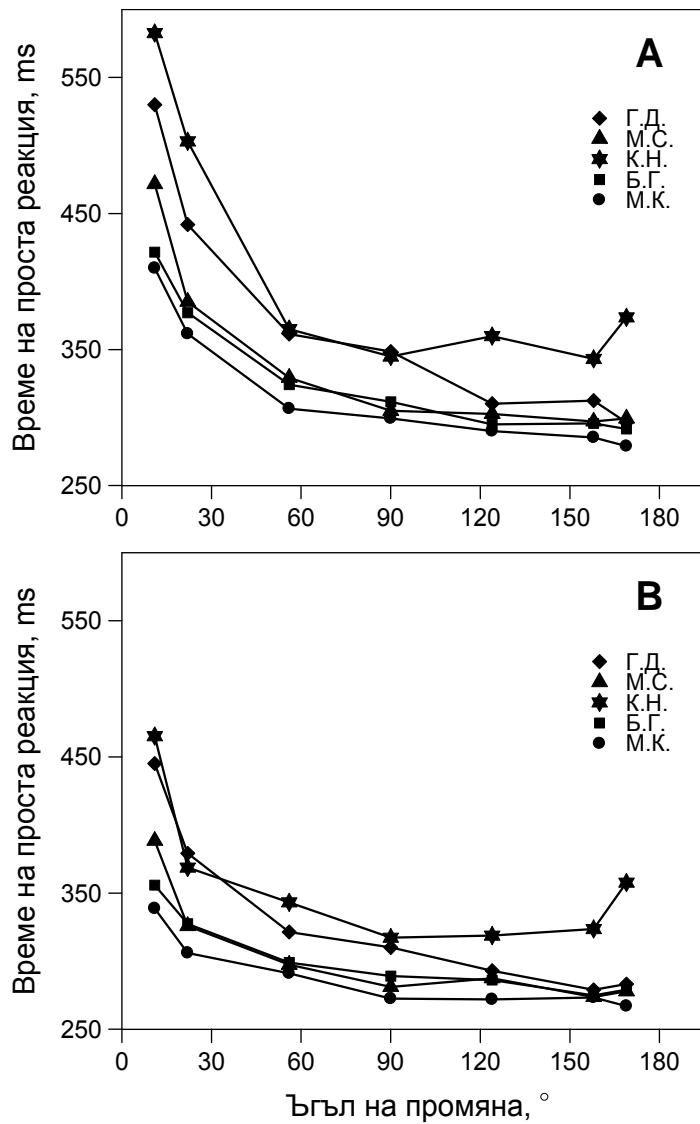
което дава аналитичен израз за “силата” на стимула при векторна промяна на скоростта от V_1 към V_2 , но при постоянна скорост $|V_1| = |V_2|$.

Уравнение (3) добре описва данните, защото времето на проста реакция може да се представи като линейна функция от $|V_2 - V_1|^{-0.67}$ (фиг. 2). При базова скорост 4 ъгл. град/сек данните се апроксимираха с $SRT = 0.12|V_2 - V_1|^{-0.67} + 0.272$, а при 12 ъгл. град/сек се апроксимираха с $SRT = 0.19|V_2 - V_1|^{-0.67} + 0.262$.

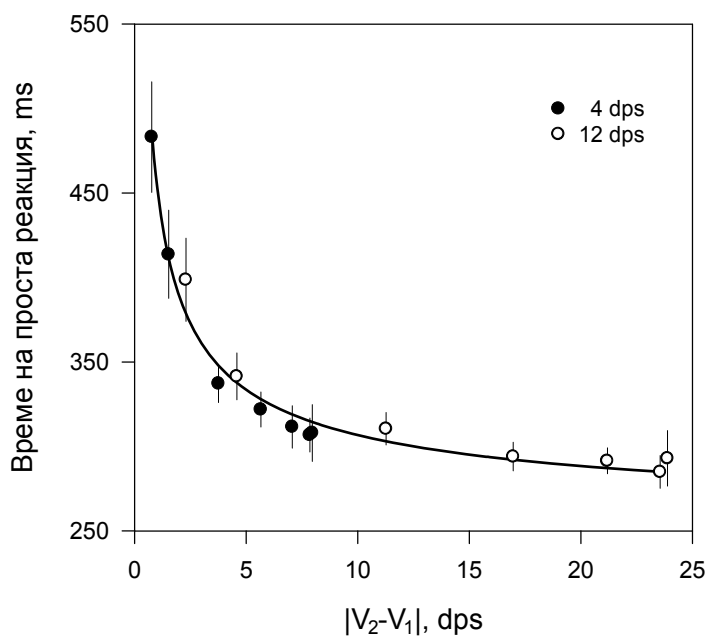


Фигура 2. Осреднени времена на проста реакция от Експеримент 1 по пет изследвани лица. Зависимостта на времето на проста реакция SRT от $|V_2 - V_1|^{-2/3}$ е линейна. Данните при скорост $V_1 = 4$ ъгл. град/сек са апроксимирани с $SRT = 0.12|V_2 - V_1|^{-2/3} + 0.272$; данните при $V_1 = 12$ ъгл. град/сек - с $SRT = 0.19|V_2 - V_1|^{-2/3} + 0.262$

В Експеримент 6 получихме, че за 4 от лицата времето на проста реакция SRT монотонно намалява с нарастване на ъгъла α на промяна (фиг. 3А,В). При едно от тях се установи слаба тенденция за увеличаване на времето на реакция при ъгли, близки до 180° . Въпреки, че целта на Експеримент 6 не беше свързана с установяването на метрика за описанието на получените времена на реакция, данните от него също бяха апроксимирани с помощта на разликата между скоростите преди и след промяната $|V_2 - V_1|$ като “сила” на стимула. На фиг. 4 са показани осреднените данни от фиг. 3А,В като функция на параметъра $|V_2 - V_1|$. Уравнението, което описва зависимостта, общо и при двете скорости, е $SRT = 0.205|V_2 - V_1|^{-0.55} + 0.249$. Апроксимацията, която се получи, е Пиеронова функция, в която “силата” на стимула е заменена от параметъра $|V_2 - V_1| = 2V \sin(\alpha/2)$. Този параметър задава смислена метрика за обясняване на резултатите от опити за откриване промяна на посоката и данните за време на проста реакция; той има естествена нула и физическа размерност на скорост. Може да се конструира област за взимане на решение, която да е свързана с големината на разликата между двете скорости $|V_2 - V_1|$. При откриване на промяна на посоката монополярен механизъм, който по дефиниция е чувствителен не към знака на промяната, а към големината на промяната, би събирал информация за параметъра $|V_2 - V_1|$ докато достигне критерий за взимане на решение.



Фигура 3. Данни от Експеримент 6. Нанесени са медианите на времената на проста реакция на пет изследвани лица като функция от ъгъла α на промяна на посоката. **А.** Данни при базова скорост 4 ъгл.град/сек; **В.** Данни при базова скорост 12 ъгл.град/сек



Фигура 4. Данните от фиг. 3 А,В за време на проста реакция SRT осреднени по пет лица са представени като функция от големината на векторната разлика между скоростта преди и след промяната, $|V_2 - V_1|$. Със запълнени кръгчета са означени данните при базова скорост 4 ъгл.град/сек, а с празни кръгчета – данните при базова скорост 12 ъгл.град/сек. Апроксимация с $SRT = 0.205 * |V_2 - V_1|^{-0.55} + 0.249$

Защо параметърът $|V_2 - V_1|$ успешно играе ролята на “сила” на стимула? Предполагаме, че зрителната система разлага вектора на скоростта на две ортогонални компоненти. Всяка от тези компоненти се “реинициализира” по начина, предложен от Dzhafarov et al (1993). Това става така. При задача за реакция към промяна посоката на движение от V_1 към V_2 зрителната система регистрира новия вектор V_2 , като го разлага на две компоненти: V_{2C} , векторна компонента колинеарна на V_1 , и V_{2N} – векторна компонента нормална към V_1 . Големините на тези две компоненти се “нормализират” към началния вектор V_1 : след нормализацията големината на V_{2C} е сведена до $|V_{2C} - V_1|$, докато “нормализираната” големина на V_{2N} си остава $|V_{2N}|$, тъй като нормалната компонента на V_1 е нула. По този начин, промяна на движението от V_1 към V_2 се открива за времето, за което би се открило начало на движение със скорост равна на “нормализирания” вектор V_2 . За нашите двумерни стимули тази скорост е с големина: $(|V_{2C} - V_1|^2 + |V_{2N}|^2)^{1/2} = |V_2 - V_1|$, с което показваме, че заместването на параметъра $|V_2 - V_1|$ като сила на промяната в уравнение (2) не е формално. То може да се обоснове с две предположения за начина, по който зрителната система анализира промяната на посоката на движение: 1.) предположение за разлагане на вектора на скоростта на две компоненти, колинеарна и нормална към първоначалното движение, и 2.) предположение за нормализация на всяка от компонентите поотделно. По този начин разширяваме модела на Dzhafarov et al (1993) за случая на двумерни промени на движението.

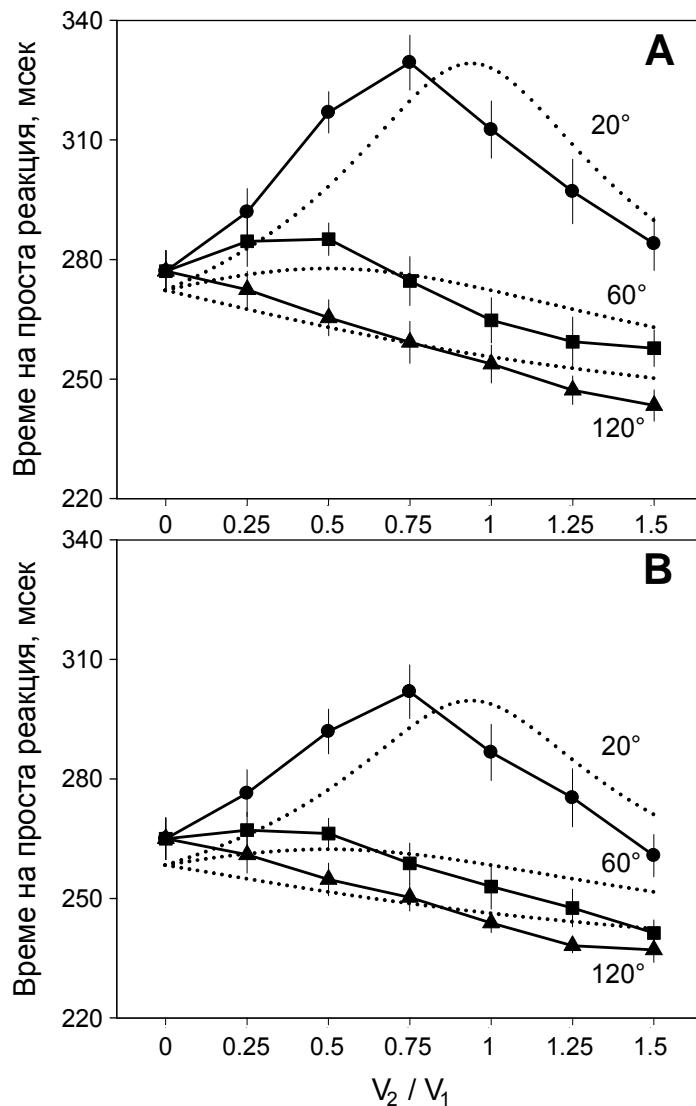
2. Алтернативни обяснения на изпълнението на проста реакция към промени на посоката на движение

Може да се предположи, че промяната на посоката на движение се открива и реакцията се изпълнява след като стимулът се отклони на някакво критично разстояние D_c спрямо началното, хоризонтално или вертикално, направление на движението. Времето T_c , което е необходимо за изминаване на разстоянието D_c , е $T_c = D_c / V \sin \alpha$. Увеличаването на ъгъла α от 0° до 90° би довело до скъсяване на времето T_c и съответно на времето на реакция RT. По-нататъшното увеличаване на α до 180° би довело до безкрайно удължаване на T_c и съответно на времето на реакция. Това предположение води до предсказване на U-видна зависимост между времето на реакция и ъгъла на промяна, каквато не се получава в експериментите.

Друга възможност за обясняване на данните се състои в предположение- то, че в процеса на откриване на промяна на посоката участват ориентационни механизми. Нека си представим, че простата реакция към промяна на посоката на движение се изпълнява единствено въз основа на разликата между ориентациите на двете линии на движение – преди и след промяната. Тогава, колкото по-голяма е разликата между ориентациите, толкова по-късо ще е времето на проста реакция. Тогава, най-късо време се очаква при 90° . Когато ъгълът α между ориентациите доближава 0° или 180° , времето на реакция би трябвало да клони към безкрайност, защото и в двата случая линиите на движение съвпадат. Както и предишната хипотеза, тази също предсказва U-видна зависимост между времето на реакция и ъгъла на промяна на посоката. Данните от двата експеримента отхвърлят ролята на ориентационно-чувствителни механизми при изпълнението на простата реакция на промяна на посока.

3. Апроксимиране на данните за време на проста реакция към комплексна промяна на движението

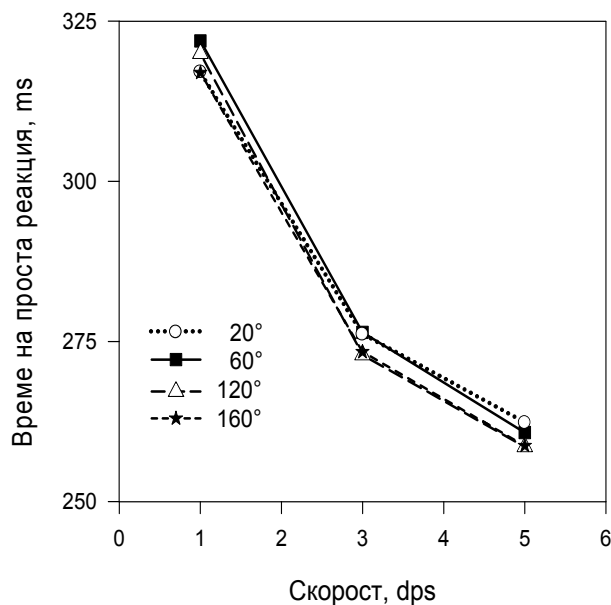
Направените дотук разглеждания, моделът, съответно и уравнение (3), са валидни в условията на проста реакция към “чиста” промяна на посоката на движение, без да се променя скоростта: векторите на движението са с различна посока, но с една и съща големина. Промяната, обаче, може да се извърши и по двата признака на движението; както по посока, така и по скорост. Именно такива промени представяхме в Експеримент 2, в който получихме, че времето на проста реакция значимо намалява с увеличаване на ъгъла на промяна и големината на скоростта (фиг. 5), при силно взаимодействие на факторите ъгъл α и скорост след промяната V_2 . Времето на проста реакция монотонно намалява с увеличаване на V_2 за 120° , обаче за 20° кривата има ясно изразен максимум, който се намира около $V_2 = 3$ ъгл. град/сек и 6 ъгл. град/сек при двете начални скорости съответно. Ефектът от началната скорост V_1 е значим. Удвояването на всички скорости води до скъсяване на всички времена на проста реакция. Данните от Експеримент 2 бяха апроксимирани с уравнение (3), като при $V_1=4$ ъгл.град/сек се получи $SRT = 0.146|V_2 - V_1|^{-0.53} + 0.203$; при $V_1=8$ ъгл.град/сек се получи $SRT = 0.165|V_2 - V_1|^{-0.39} + 0.186$. Тези уравнения са използвани за начертаване на прекъснатите линии на фиг. 5А,В. Уравнение (3), обаче, не може да опише точно получените данни. Причината е, че то предсказва максимум за промяна на 20° при $V_2 \approx V_1$, но максимумът се получава



Фигура 5. Показани са данните от Експеримент 2 и неуспешното им апроксимиране (прекъснатите линии) с уравнение (3), $SRT=C|V_2-V_1|^n+SRT_0$. Максимумът на експерименталните криви (плътните криви) е отместен наляво в сравнение с максимума на изчислените криви

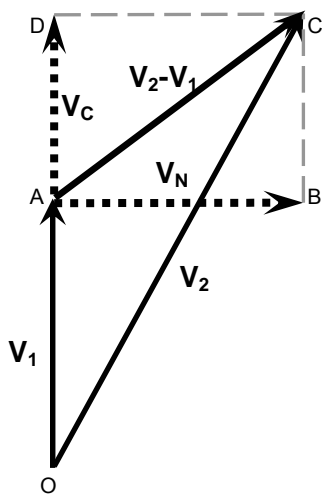
при $V_2 \approx 0.75V_1$, т.е. максимумът на получените криви е отместен наляво в сравнение с максимума на изчислените криви. Този резултат се наблюдава при всички лица и при двете начални скорости. Доказва се, че положението на максимума не зависи от параметрите C , n и SRT_0 ; то се определя само от двата вектора V_1 и V_2 . Тогава, очевидно параметърът $|V_2-V_1|$ не отразява достатъчно точно силата на промяната в условията на Експеримент 2.

В Експеримент 3 не установихме ефект от посоката на движение върху времето на проста реакция (фиг. 6). Липсата на такъв ефект означава, че резултатите от Експеримент 2 не са контаминирани от дирекционална анизотропия на зрителното поле и наистина са резултат от двата вектора на движение, преди и след промяната.



Фигура 6. Показани са данните от Експеримент 3 осреднени по шест изследвани лица. Времето на проста реакция към начало на движение с различни посоки, 20°, 60°, 120° и 160° надясно от вертикалата, е представено като функция на скоростта. Стандартната грешка е между 8 msec (при скорост 5 ъгл. град/сек) и 12 msec (при скорост 1 ъгл.град/сек)

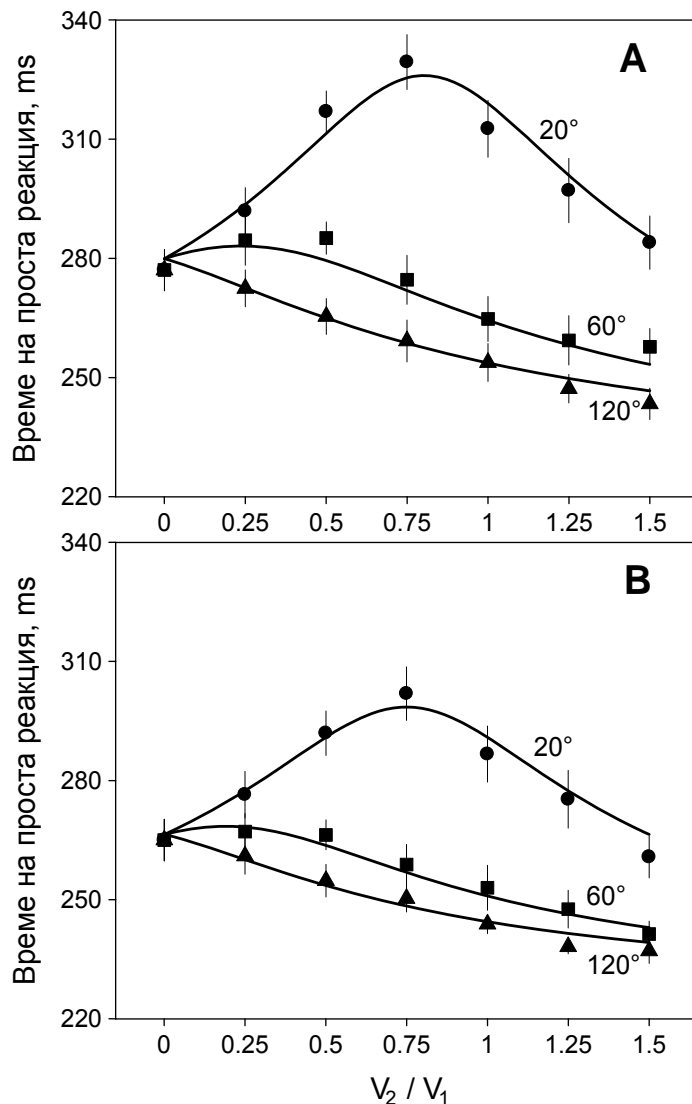
Стимулите представяни в Експеримент 2 се променят по два атрибута, големина и посока на вектора на скоростта. Нашата хипотеза е, че информацията за двата атрибута на промяната се



интегрира или сумира по някакъв начин за да предизвика отговор. Нека разгледаме “анатомията” на една промяна на вектора на движение от V_1 към V_2 . Промяната може да се изрази с разликата $V_2 - V_1$ на тези два вектора. Векторът $V_2 - V_1$ се разлага, или може да се представи като резултантен, като сума, от две взаимно ортогонални векторни компоненти, V_C и V_N , т.е. $V_2 - V_1 = V_C + V_N$. Наричаме V_C колинеарна към V_1 компонента на промяната, $V_C = V_{2C} - V_1$, и V_N нормална към V_1 компонента

на промяната, $V_N = V_{2N}$ (на фигурата векторите с прекъснати линии). За големината на вектора на промяната може да се напише $|V_2 - V_1| = |V_C + V_N|$. Предположихме, че за да се обясни изместването на максимума, силата на промяната трябва да се представи от абсолютната стойност на претеглената сума от двете компоненти на промяната, $S = |wV_C + (1-w)V_N|$, където $0 < w < 1$. За проверката на тази хипотеза съставихме уравнението $SRT = C(V_1) |wV_C + (1-w)V_N|^n + SRT_0$ и приложихме нелинейна регресия, за да получим стойностите на трите параметъра C , n и SRT_0 и теглата w и $1-w$, с които се сумират компонентите. При $V_1 = 4$ ъгл. град/сек данните се апроксимираха с $SRT = 0.087 |0.39V_C + 0.61V_N|^{-0.8} + 0.219$; при $V_1 = 8$ ъгл. град/сек – с $SRT = 0.114 |0.36V_C + 0.64V_N|^{-0.89} + 0.222$. На фиг. 7 А, В данните за време на проста реакция от Експеримент 2 са описани с големината на

претеглената векторна сума $S=|wV_C+(1-w)V_N|$. За двете начални скорости V_1 параметърът w е приблизително 0.4, т.е. нормалната



Фигура 7. Осреднени данни за време на проста реакция SRT от седем изследвани лица при три ъгъла на промяна на посоката. Нанесена е стандартната грешка. Големината на скоростта след промяната е зададена по абцисата като част или процент от началната скорост. **А.** Данните при $V_1=4$ ъгл.град/сек се апроксимират с $SRT = 0.087|0.39V_C + 0.61V_N|^{-0.8} + 0.219$; **В.** Данните при $V_1=8$ ъгл.град/сек се апроксимират с $SRT = 0.114|0.36V_C + 0.64V_N|^{-0.89} + 0.222$

компонента на вектора на промяната се взема с малко по-високо тегло от колинеарната компонента. Това е достатъчно за изместването на максимума към по-ниските скорости след промяната V_2 .

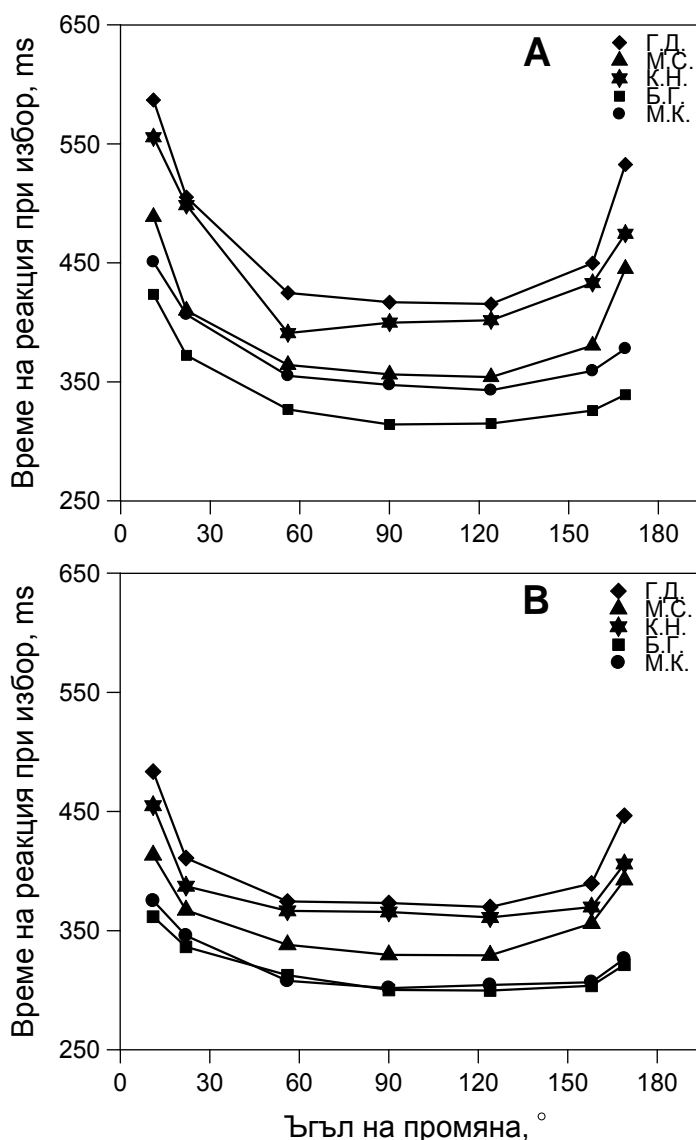
В заключение, данните подкрепят хипотезата, че времето на проста реакция към произволна двумерна промяна на вектора на зрително движение се определя от абсолютната стойност на претеглената сума на колинеарната и нормалната компоненти на промяната, $S=|wV_C+(1-w)V_N|$, където $0 < w < 0.5$. Изглежда, че при задача за проста реакция зрителната система счита нормалната компонента за “по-важна” от колинеарната. Двата атрибута на промяната се сумират с различни тегла: нормалната компонента V_N влиза в сумата с по-голямо тегло от колинеарната V_C . Използвайки тази сума като сила, или интензитет на стимула във функцията на Пиерон, е възможно описването на времето на проста реакция към

всякакви промени на един и същ начален вектор с едно единствено уравнение.

4. Апроксимиране и интерпретация на изпълнението на задачата за реакция на избор

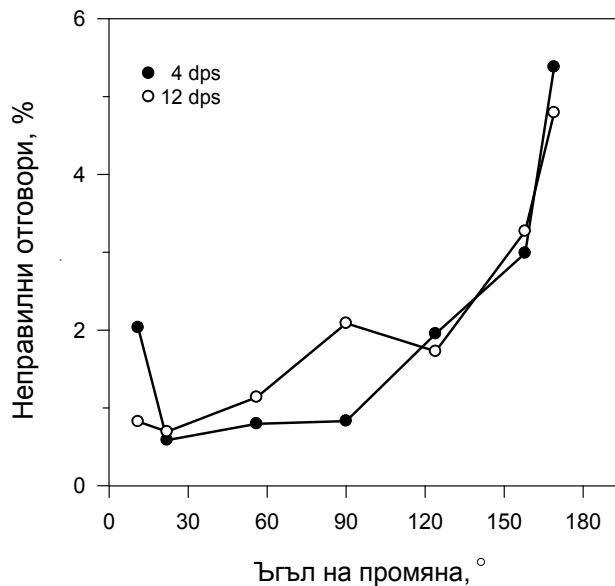
4.1. Апроксимиране на данните за време на реакция на избор към промяна на посоката на движение при постоянна скорост

Данните от Експеримент 7 показват U-видна крива на зависимостта на времето на реакция на избор CRT с увеличаване на ъгъла на промяна на посоката α от 11° до 169° (фиг. 8А,В) при двете скорости. При всички ъгли на промяна, времената на реакция при избор за 4 ъгл.град/сек са по-дълги от времената за 12 ъгл.град/сек. Оказа се, че U-видните криви са асиметрични по отношение на $\alpha=90^\circ$: при ъгли на промяна $\alpha \leq 90^\circ$ времената на избор са по-дълги (фиг. 8А,В) и процентът на неправилните отговори е по-нисък при ъгли



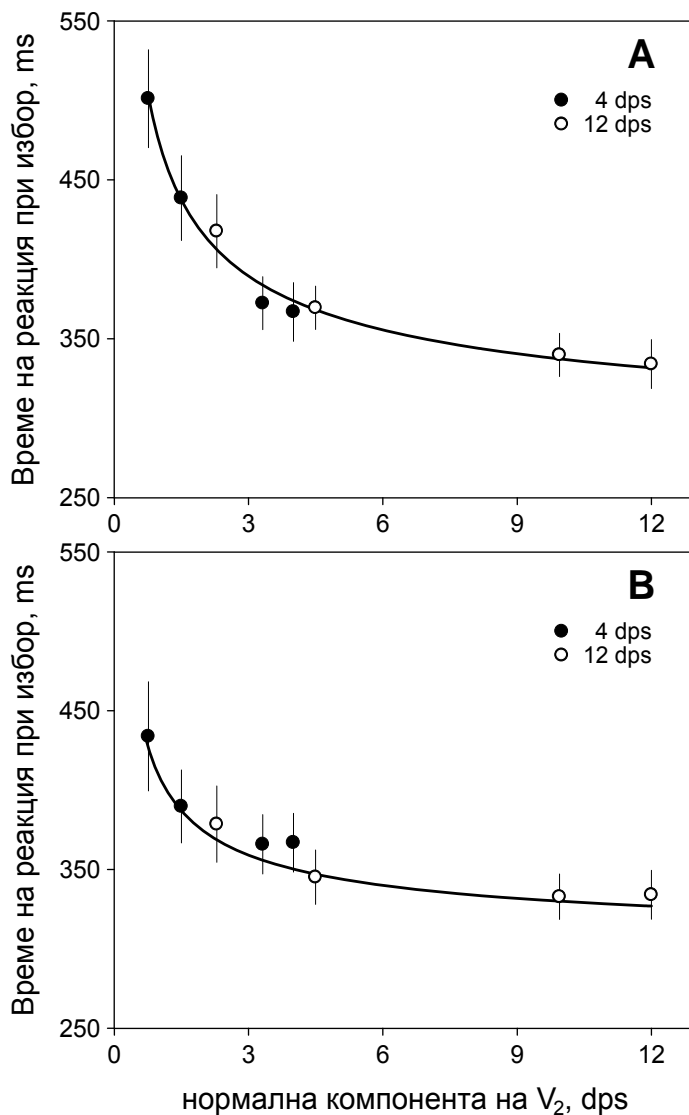
Фигура 8. Данни от Експеримент 7. Показани са медианите на времената на реакция при избор CRT на пет изследвани лица. Времето на реакция при избор е U-видна функция от ъгъла α на промяна на посоката. **А.** Данни при базова скорост 4 ъгл.град/сек; **В.** Данни при базова скорост 12 ъгл.град/сек

$\alpha < 90^\circ$ (фиг. 9). Фактът, че процентът на грешките систематично нараства с нарастването на ъгъла, би могъл да обясни несиметричността на наблюдаваните зависимости. Разликите между времената при ъгли по-малки и при ъгли по-големи от 90° може да се дължат на различните стратегии на отговор приети от лицата: по неизвестни причини при $\alpha > 90^\circ$ лицата решават да реагират по-бързо, но това става за сметка на по-висок процент неправилни отговори (фиг.9).



Фигура 9. Процент неправилни отговори при изпълнение на реакция при избор в Експеримент 7 като функция от ъгъла на промяна на посоката при скорости 4 и 12 ъгл. град/сек. Данните са обединени за всички изследвани лица

Значимите количествени разлики между времената на избор към симетричните по отношение на промяната под ъгъл 90° промени на посоката налагат описанието на данните да се направи поотделно, с две Пиеронови функции: една за по-малки от 90° ъгли, и друга за по-големи от 90° ъгли. При обясняване на данните от Експеримент 7 отново използваме хипотезата за разлагане на вектора на движение. Векторът V_2 след промяната се разлага на две ортогонални компоненти, колинеарна на началната скорост V_1 компонента $V_{2C} = V_2 \cos \alpha$ и нормална компонента $V_{2N} = V_2 \sin \alpha$. Предполагаме, че нормалната компонентата V_{2N} определя различаването на знака на промяната – наляво или надясно е било отклонението. На фиг. 10А,В данните от фиг. 8А,В са показани като функция на абсолютната стойност на нормалната компонента на скоростта, $|V_{2N}|$. Данните за време на реакция на избор CRT при ъгли на промяна $\alpha \leq 90^\circ$ се описаха с $CRT = 0.2 * |V_{2N}|^{-0.5} + 0.274$, а данните при ъгли $\alpha > 90^\circ$ – с $CRT = 0.11 * |V_{2N}|^{-0.55} + 0.299$.



Фигура 10. Данните от фиг. 8 за време на реакция при избор CRT осреднени по пет лица като функция от нормалната компонента на скоростта след промяната. Със запълнени кръгчета са означени данните при скорост 4 ъгл. град/сек; с празни кръгчета – данните при 12 ъгл. град/сек. **А.** Данните при ъгли $\alpha \leq 90^\circ$ се апроксимират с $CRT=0.2*|V_{2N}|^{-0.5}+0.274$; **В.** Данните при ъгли $\alpha > 90^\circ$ се апроксимират с $CRT=0.11*|V_{2N}|^{-0.55}+0.299$

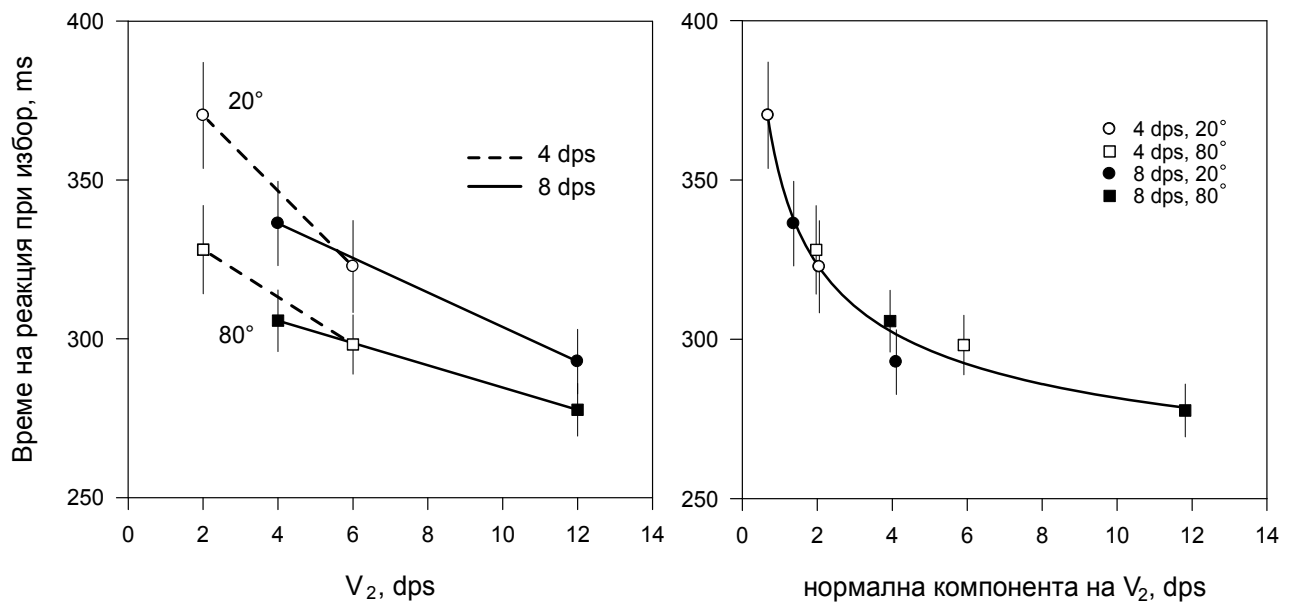
Нормалната компонента на скоростта след промяната може формално да се използва като “интензитет” на стимула в случая на реакция при избор към промяна посоката на скоростта; също както $|V_2 - V_1|$, и параметърът $|V_{2N}|$ има естествена нула и размерност на скорост и нито неговата стойност, нито неговият знак зависят от посоката на началното движение. При различаване промяна на посоката механизъмът, който ще събира информация за знака на нормалната компонента докато достигне определена положителна или отрицателна стойност на критерия, по дефиниция е от биполярен тип.

Времето на реакция на избор CRT при различни ъгли на промяна добре се апроксимира с уравнение (1), но за разлика от времето на проста реакция SRT параметърът “сила” S в случая се оказва единствено $|V_{2N}|$, големината на компонентата на скоростта след промяната нормална към началната скорост:

$$CRT=C|V_{2N}|^n+CRT_0 \quad (4)$$

4.2. Апроксимиране на данните за време на реакция на избор към промени на движението както по посока, така и по скорост

В Експеримент 4 получихме, че времето на реакция на избор се определя от големината и от посоката на вектора V_2 на движението след промяната (фиг. 11). Ние използвахме подхода от предишния раздел и представихме данните като функция на нормалната компонента на промяната V_{2N} (фиг. 12) с $CRT = 119|V_{2N}|^{-0.38} + 232$.



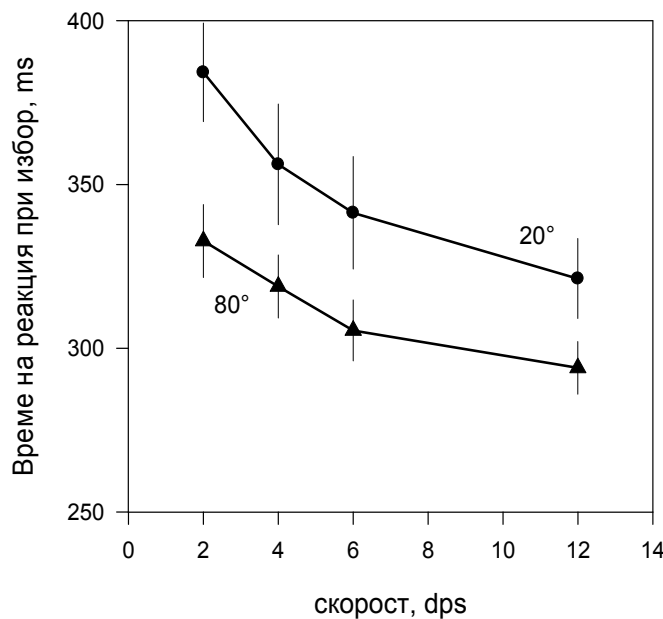
Фигура 11. Данни за време на реакция при избор от Експеримент 4. Всяка точка е средна стойност от медианите на шест изследвани лица. Времето на реакция при избор е показано в зависимост от големината на скоростта V_2 след промяната.

Фигура 12. Данните за време на реакция при избор от Експеримент 4 са представени като функция от големината на нормалната компонента V_{2N} на скоростта след промяната. Данните се апроксимират с $CRT = 119V_{2N}^{-0.38} + 232$

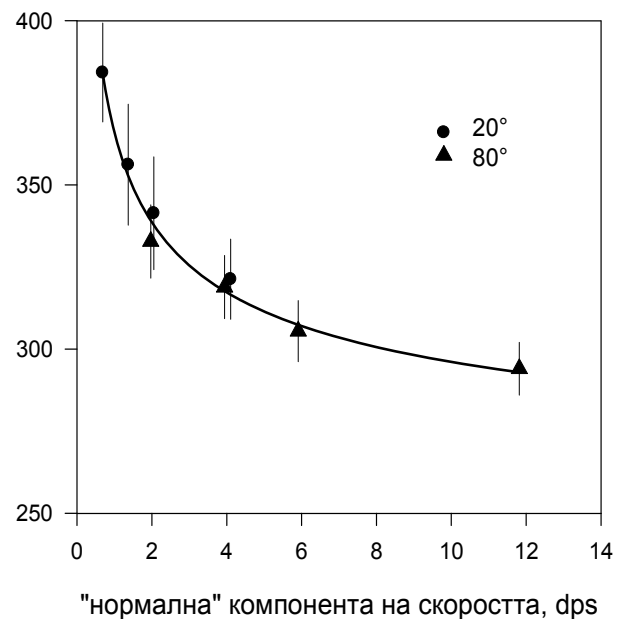
Параметърът V_{2N} се оказва достатъчен за описание на изпълнението на реакция при избор, както за данните от Експеримент 7, така за данните от Експеримент 4, като при апроксимирането на данните за време на реакция на избор не е необходимо да се вземе пред вид началната скорост на движение. Този факт може да означава, че бързината на реакцията на избор изобщо не зависи от началната скорост. Ако наистина времето на реакция на избор не зависи от началното движение V_1 , би следвало при драстична замяна на използваните начални скорости, например при нулева начална скорост, да се очакват резултати сходни с резултатите от Експеримент 4.

4.3. Апроксимиране на данните за време на реакция на избор към начало на движение в различни посоки

В Експеримент 5 поучихме, че при фиксиран ъгъл α времето на реакция при избор монотонно намалява с увеличаване на скоростта (фиг. 13). Тъй като в този опит начално движение не се представяше, “нормалната” компонента $V_{2N}=V_2\sin\alpha$ беше формално изчислена по отношение на вертикалата. Данните от Експеримент 5 добре се описаха като функция на “нормалната” компонента на скоростта V_{2N} (фиг. 14) с уравнението $CRT = 124/|V_{2N}|^{-0.36} + 242$, което практически е същото като полученото при ненулева начална скорост.



Фигура 13. Данни от Експеримент 5 за време на реакция при избор към начало на движение с посоки на ъгли 20° и 80° спрямо вертикалата. Данните са осреднени по шест лица. Нанесена е стандартната грешка. Времето на реакция при избор е представено в зависимост от големината на скоростта



Фигура 14. Данни от Експеримент 5. Времето на реакция при избор CRT към начало на движение е показано като функция на хоризонталната компонента на скоростта, която в съответствие с Експеримент 4 е наречена “нормална” компонента V_{2N} и формално е изчислена по отношение на вертикалата. Данните се апроксимират с $CRT=124V_{2N}^{-0.36}+242$

В заключение, само и единствено големината на нормалната компонента V_{2N} изразява силата на стимула при изпълнение на реакция на избор. За разлика от времето на проста реакция, времето на реакция на избор не зависи от началната скорост V_1 . Параметърът $S=|wV_C+(1-w)V_N|$ може формално да се използва като „сила” на стимула и при описание на данни от реакция на избор, но с тегло $w=0$.

4.4. Хипотетични процеси, които осъществяват етапа на различаване при реакцията на избор

Липсата на ефект от началната скорост V_1 при изпълнението на задача за реакция при избор повдига въпроса как протича самият процес на реакция при избор. Следните възможности заслужават разглеждане.

Когато се изпълнява дуалтернативна реакция при избор към посоки α_1 и α_2 , зрителната система установява посоката на ъглополовящата, $(\alpha_1 + \alpha_2)/2$, като отправна ос. Това става по време на тренировъчните проби или въз основа на инструкцията. Тогава, знакът на нормалната компонента на движението V_{2N} по отношение на тази ос се регистрира независимо дали се представя или не начално движение по ъглополовящата. В случая на Експерименти 4 и 5 отправната ъглополовяща посока съвпада с вертикалата и регистрирането на нормалната компонента V_{2N} става лесно. С подходящ модел от известните модели за време на реакция може да се даде решение дали нормалната компонента на скоростта V_{2N} е наляво или надясно. Като само посоката на вектора V_2 не е от решаващо значение за времето на реакция на избор, а е важно колко бързо стимулът се отдалечава от отправната зрителна ос.

Когато се изпълнява реакция на избор с две алтернативи, както е в Експерименти 4 и 7, зрителната система може да регистрира и да акумулира информация за знака на отклонението на точките по отношение на началното направление на движението. В известен смисъл може да се представи, че различаването на две посоки на движение се извършва по-скоро между двете противоположни посоки $+V_{2N}$ и $-V_{2N}$, отколкото между реалните посоки на вектора V_2 . Това е и смисъла на уравнение (4). Колкото по-ниска е скоростта на отдалечаване на точките по хоризонталата, толкова по-дълго време е необходимо за събиране на достатъчно количество информация за взимане на решение и изпълнение на реакция на избор. Изглежда в този случай напълно се игнорира колинеарната компонента V_C ; затова и няма ефект от началната скорост V_1 върху времето на реакция на избор. С точно това редуциране на ползваната входна информация зрителната система избира най-рационалния начин за различаване на промени на движението при дефицит на време.

Все пак въпросът за отправната ос, по отношение на която се извличат двете компоненти на промяната, остава отворен. В Експерименти 2 и 4 векторът V_1 на началното движение може да послужи за такава ос. Но и субективната вертикала, задавана с

посоката на усещането за гравитация, също може да се използва за отправна ос. Това предположение изглежда оправдано при реакция на избор в условията на Експеримент 5, в който не се представя вектора V_1 . Въпросът за отправната ос, обаче, е труден за решаване при други условия на наблюдение, при които вертикалата няма да може да се използва за отправна ос или използването ѝ ще е безсмислено. За такива условия може да се направи хипотезата, че за отправна ос се ползва ъглополовящата на ъгъла формиран от двете алтернативи на избора. Изследваното лице може да изгради представата си за нея по време на тренировъчната сесия или въз основа на инструкцията. Тогава, знакът на нормалната към оста компонента може да се регистрира независимо дали се представя или не начално движение по посока на ъглополовящата. Следователно, уравнение (4) добре апроксимира времето на реакция на избор в най-опростения случай: когато вертикалата служи за отправна ос, когато има пълна съвместимост на стимулите и отговорите, и когато алтернативите на избора са еднакво откриваеми.

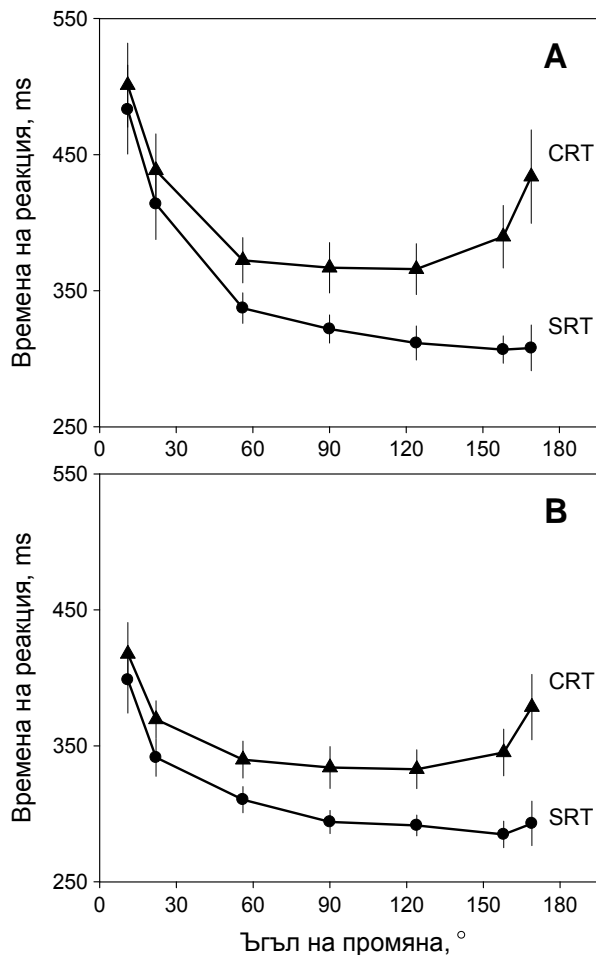
Въпреки някои неизяснени въпроси и ограничения при разглежданията, ние демонстрирахме, че данните за времената на реакция могат да се опишат с **единен** модел, в който се предполага перцептивно разлагане на вектора V_2 на две взаимно ортогонални компоненти, като времената на реакция са функция на тези компоненти.

5. Механизми на откриване и различаване на промени на зрително движение при изпълнението на проста реакция и реакция на избор към промените

5.1. Сравняване изпълненията на проста реакция и на реакция на избор към промяна на посоката

В Експерименти 6 и 7 се представяха едни и същи стимули, но лицата изпълняваха две различни задачи: за проста реакция и за реакция при избор. В Експеримент 6 времето на проста реакция монотонно намаляваше с нарастване на ъгъла на промяна на посоката (фиг. 3). В Експеримент 7 зависимостта на времето на реакция на избор от големината на ъгъла се описваше от U-видна крива (фиг. 8). Демонстрираната разлика (фиг. 15) между времената на проста реакция и на реакция на избор в зависимост от ъгъла на промяна на посоката е важен аргумент в полза на предположението за наличие на два обособени механизма, монополярен и биполярен. Вероятно тези механизми ползват различни аспекти на зрителната информация за

движението. Това предположение се подкрепя от факта, че “силата” на стимула при изпълнение на проста реакция и на реакция на избор се дава от два различни параметъра, съответно големината на разликата между скоростите $|V_2 - V_1|$ и нормалната компонента на скоростта V_{2N} .



Фигура 15. Сравнение на осреднените по пет лица данни от Експерименти 6 и 7. Демонстрирана е разликата между времето на проста реакция SRT и времето на реакция при избор CRT в зависимост от ъгъла на промяна на посоката. Кривата на времето на проста реакция е монотонно намаляваща, докато кривата на времето на реакция на избор е U-видна. Освен това двете криви са много близки в точките за малките ъгли: при промяна на 11° разликата между времето на избор и на проста реакция е 18–19 msec (съответно при 4 и 12 ъгл.град/сек). **А.** Сравнение при скорост 4 ъгл.град/сек; **В.** Сравнение при скорост 12 ъгл.град/сек

Следващият въпрос е, дали етапите на откриване и на различаване на стимула са строго последователни, или протичат повече или по-малко паралелно. Важен резултат от Експерименти 6 и 7 е, че при двете базови скорости времената на проста реакция и на реакция на избор са доста близки при малките ъгли на промяна на посоката. Там разликата между двата вектора V_1 и V_2 почти съвпада с нормалната компонента на скоростта след промяната, V_{2N} . Това навежда на мисълта, че двата механизма работят паралелно. В литературата са известни сравнения между времена на реакция към зрителни стимули, които подкрепят хипотезата за два механизма, за откриване и разпознаване, които работят последователно при задача за избор. В настоящата работа представяме пример, в който кривите

на времената на проста реакция и на реакция на избор от “интензитета” на стимула не са паралелни, и още повече, разликата между най-големите им стойности е твърде малка. Нашите данни подкрепят хипотезата за два паралелни механизма.

Задачите за проста реакция и за реакция при избор се изпълняват в едни и същи сесии на Експеримент 8. Средната разлика от 16-26 мсек между времената на реакция на избор и на проста реакция към 11° -промяна изглежда прекалено малка за да подкрепи хипотезата за последователна работа на двата механизма. Като се има пред вид, че отговарянето с две ръце общо взето изисква повече време от отговарянето с една ръка, може да се предположи, че в Експеримент 8 в случая на малки ъгли на промяна, при които $|V_2 - V_1| \approx V_{2N}$, времената за откриване и за различаване на стимула може би всъщност са еднакви. Двата паралелни механизма дори могат да се състезават помежду си. Резултатите на изследваното лице К.Н. дават такъв пример в Експеримент 6. При ъгъл на промяна α клонящ към 180° стойността на параметъра $|V_2 - V_1|$ монотонно нараства и съответно времето на проста реакция би трябвало да намалява монотонно. Обаче за данните на лицето К.Н. това не е така: неговото време на проста реакция не намалява монотонно с нарастване на ъгъла на промяна (фиг. 3А,В, данните нанесени със звездички). Изглежда, че в този случай биполярният механизъм изпълнява функцията на монополярия.

В Експеримент 9 получихме, че праговото времетраене за откриване на 169° промени е много по-късо от това за различаване на същите промени. Тази находка е в съгласие с резултатите от Експерименти 6 и 7, че времената на проста реакция към промяна на посоката на 169° са по-къси от времената на реакция на избор към същата промяна. Резултатите от Експеримент 9 взети заедно с тези от Експерименти 6 и 7 показват, че при промяна на посоката на 169° , процесът на откриване завършва много по-рано от процеса на различаване. Ниските нива на критерия за 169° промяна при задачата за реакция при избор могат да се дължат на ранното откриване на промяната от монополярен механизъм. Вече открило промяната, лицето може да стане нетърпеливо и да приеме стратегия за по-бързо (но неточно) даване на отговор. Може би тук се крие причината за различните стратегии на лицата при реакциите им към различни ъгли на промяна на посоката.

5.2. Парадоксът: малки промени на посоката се различават по-бързо, отколкото се откриват

В Експеримент 9 получаваме парадоксалния резултат, че различаването на промяна на посоката на 11° може да се изпълни по-добре от откриването на същата промяна. На някои лица е необходимо 1.5–2 пъти по-дълго време за да открият промяна на 11° отколкото да я различат. В литературата има аналогична находка, но за пространствени прагове за откриване и различаване на верниерни стимули. В Експеримент 9 се прилагаше двуинтервален принудителен избор и отговорите би следвало да се определят от *разликата* между величините на промяната в първия и във втория интервал на пробата. При задачата за откриване тази разлика е $\pm 11^\circ$; при задачата за различаване тя е $\pm 22^\circ$. Ясно е, че фиксирано ниво правилни отговори следва да се достига за по-кратко време на представяне при разлика 22° между стимулите в двата интервала, отколкото при разлика 11° . По този начин се е получил “парадоксалния” резултат, че с двуинтервален принудителен избор промяната може по-бързо да се различи отколкото открие.

Заключение: Дотук данните подкрепят хипотезата, че два обособени механизма управляват откриването и различаването на промени на посоката на зрително движение. Те ползват различни аспекти на информацията за движение. Изглежда механизмите работят паралелно и дори се конкурират един с друг, което води до приблизително еднакви времена на проста реакция и на реакция при избор към малки ъгли на промяна, при които разликата между векторите на движението преди и след промяната почти съвпада с нормалната компонента на скоростта след промяната.

5.3. Сравняване изпълненията на проста реакция и на реакция на избор към комплексни промени на движението

Изпълненията на проста и на реакция на избор имат различни характеристики. При фиксирана начална скорост V_1 и надпрагов ъгъл α на промяна на посоката, с намаляване на скоростта след промяната V_2 времето на реакция на избор нараства и клони към безкрайност, докато времето на проста реакция клони към крайна стойност. Получихме също, че при фиксирани скорост V_2 и ъгъл α , промените на началната скорост V_1 съществено влияят върху времето на проста реакция, но изобщо не се отразяват върху времето на реакция на избор. Замяната на вектора на началното движение с нулевия вектор

(в Експерименти 3 и 5) свършено различно променя хода на кривите на времето на проста и на реакция на избор. Получихме драматична промяна във формата на кривата на времето на проста реакция като функция на скоростта V_2 (сравнение на Експерименти 2 и 3, фиг. 5 и фиг. 6) и от друга страна, получихме практически еднакви криви за времето на реакция на избор независимо от представяната начална скорост (сравнение на Експерименти 4 и 5, фиг. 12 и фиг. 14). Този резултат е силен аргумент в полза на заключението ни, че два различни механизма управляват процесите откриване и различаване при проста реакция и при реакция на избор.

ОБЩА ДИСКУСИЯ

В настоящата работа хипотезата за разлагане на вектора на движението е ключът към предлагането на параметрите $|V_2 - V_1|$ и V_{2N} за ролята на “интензитет” в Пиероновата функция. Не са ни известни неврофизиологични данни, които да подкрепят тази хипотеза. Но съществуват перцептивни феномени, които показват, че такъв процес на векторно разлагане може наистина да съществува в зрителната система. Ние приложихме принципите на векторен анализ (разлагане на вектори) и векторен синтез (сумиране на атрибутите на промяната за получаване силата на стимула) за случая на изпълнение на задачи за реакция към зрително движение. Така успяхме да представим времената на проста и на реакция при избор към промени на движението като функции от компонентите на промяната. Този начин на описание на данните се основава на хипотезата за разлагане на вектора на движението на две ортогонални компоненти и понятието “детектори на движение” не е използвано за това обяснение. Детектори на посока са без съмнение включени в процеса на възприятие на движение, но е под въпрос дали те взимат участие в процеса на възприятие на промяна на движение.

Известно е схващането, че посоката на движение се регистрира от селективни единици, канали или детектори, които са настроени към определена посока на движение. Едно приемливо обяснение на нашите резултати за време на проста реакция може да се предложи на основата на факта, че тези детектори на посока имат определена ивица на пропускане. Началното движение с посока V_1 предизвиква активност в детектори в дадена област. Най-висока е активността на детекторите с настройка към посоката V_1 , но в някаква степен се активират също и детекторите с настройка към посоки, съседни на

посоката V_1 .

Предполага се, че разпределението от активности (сензорния континуум) се наблюдава от монополярен механизъм. Когато посоката се промени на V_2 , едно ново разпределение възниква на сензорния континуум. Монополярният механизъм трябва да реши дали новата активност принадлежи на старото или на новото разпределение. Информацията за новото разпределение се събира до определено ниво на някакъв критерий. Когато критичното ниво се достигне, се взема решение, че посоката се е променила и се извършва проста реакция. Колкото по-голямо е припокриването на старото и новото разпределения на активността, толкова по-дълго време ще изисква достигането на критерия. Тогава увеличаването на ъгъла на промяна α от 0° до 180° съответствува на увеличаване на разстоянието между новото и старото разпределение, което води до скъсяване на времената за откриване и съответно на времената на реакция. Когато двете разпределения са разделени с повече от две полу-ширини на пропускане на детекторите на посока, времето за откриване се очаква да не намалява по-нататък повече, достигайки една асимптотична стойност. Кривите на фиг.3 А,В достигат до асимптота при ъгли на промяна около 100° . Тогава, полу-ширината на предполагаемите детектори на посока ще е около $\pm 50^\circ$, стойност, която е в съгласие с изследванията на различни автори.

По-трудно е обясняването на данните от време на реакция на избор въз основа на двете, ново и старо, разпределения на активността. Нека допуснем, че модата на старото разпределение определя нулевата точка в сензорния континуум с положителни и отрицателни стойности от двете ѝ страни. За ъгли на промяна $\alpha < 90^\circ$ биполярен механизъм би могъл да установи дали новото разпределение се е появило в положителната или в отрицателната страна на континуума. Решение се взема когато се събере информация достатъчна за достигане на положителен или отрицателен критерий. Процесът на събиране на информация ще изисква по-кратко време, ако старото и новото разпределение са по-отдалечени, т.е. ако ъгълът α е по-голям. Обаче при промени на посоката на ъгли $\alpha > 90^\circ$ времето на реакция на избор отново ще нараства въпреки голямата отдалеченост на разпределенията. Следователно, решението може би не се взема въз основа на сравнението между двете сензорни разпределения предизвикани от двата вектора на движението, V_1 и V_2 , а въз основа само на разпределението предизвикано от вектора V_2 . С какво зрителната

система сравнява това разпределение?

Могат да се направят най-различни спекулативни предположения. Например, V_2 -разпределението може да бъде сравнявано с две “стандартни” величини, “еталони”, които са в паметта и съответстват на “лява” и “дясна” промяна. Друга възможност е да се конструира кръгла област за взимане на решения с две нулеви точки съответстващи на посоките $+V_1$ и $-V_1$. Така се образуват два полукръга, съответно за “лява” и “дясна” промяна. Времето за взимане на решение може да се определя от отношението между частите на V_2 -разпределението, които попадат в двата полукръга.

Още една възможност е биполярният механизъм да сравнява ориентациите на линиите на движение преди и след промяната на посоката. При различаване на посока на движение могат да бъдат въввлечени ориентационни механизми. Ако е така, би следвало 11° промяна да предизвика същия сензорен ефект, какъвто би предизвикала 169° промяна и най-късите времена на реакция на избор би трябвало да се очакват при 90° промяна. Отново, трудността е в дефинирането на “ляво” и “дясно” за 11° и 169° промени. Основната причина за това е предположението, че областта за взимане на решение е свързана с континуума от ъгли на промяна α . Този континуум е ограничен до 360° и няма естествена нула. Тогава понятията за “по-голямо” и “по-малко” са произволни, когато ъгълът α се разглежда като “сила” на стимула. Това води до трудности във формулирането на смислено правило за решение.

Ние обяснихме асиметрията на U-видните криви за време на реакция на избор (фиг. 8) със стратегията за отговор. Друго възможно обяснение е, че зрителната система може би е по-чувствителна към промени на 169° отколкото към промени на 11° . Резултатите от Експеримент 9 не подкрепят това предположение. Средните прагови времетраения за различаване на 11° и 169° промени практически са едни и същи при 4 ъгл.град/сек, а тенденцията за скъсяване на праговото времетраене за 169° промени при 12 ъгл.град/сек е статистически незначима.

Изглежда, че механизмът на детекторите на движение не е единствен за различаване посока на движение. В литературата има данни, че посоката на зрителен стимул движещ се по права линия, се идентифицира от същия механизъм, който идентифицира ориентацията на неподвижна линия. При движението на стимулите се образуват т.нар. “черти на движение” или “линии на движение”

(“motion streaks”, “speed-lines”), които се дължат на времевата сумация в зрителната система. Линиите от движение могат да активират неврон или цяла популация от неврони с настройка към определена ориентация паралелна на посоката на движение. Ориентацията на линии от движение се регистрира от ориентационно-чувствителни механизми в зрителната система и по този начин се подпомага различаването на посока на движение.

Тогава, при движение на конфигурацията от точки в посока α_1 , детекторите настроени към α_1 - посока и/или ориентация максимално се активират, обаче в някаква степен се активират и други детектори настроени към съседни, близки до α_1 - посоката и/или ориентацията. Друго разпределение от активности се получава когато движението е с друга посока, α_2 . Този процес може да се илюстрира с област за взимане на решение и разпределение от активностите, които се получават по време на една проба. В областта за взимане на решение има отправна точка или критерий. Въвеждането на критерий е еквивалентно на въвеждането на ъглополовящата между посоките α_1 и α_2 описано по-горе. Във всяка проба механизмът трябва да реши дали разпределението е наляво или надясно по отношение на критерия. По този начин може да се различи α_1 или α_2 е представяна. Колкото по-голямо е припокриването на двете разпределения толкова по-дълго време е необходимо за събиране на достатъчно информация за взимане на решение и съответно за изпълнение на реакция при избор.

Такъв модел може да обясни нарастването на времето на реакция при избор с намаляване ъгъла на промяна на посоката. Трябва да се отбележи, че в това разглеждане големината на вектора на началното движение V_1 изобщо не участва. Тогава, моделът предсказва получаването на приблизително едно и също време на избор при вариране на големината на началната скорост V_1 и дори при отсъствие на начално движение, както получихме в Експерименти 4 и 5. Обаче, това още не е достатъчно за обясняване на наблюдавания ефект от големината на скоростта. Такъв модел трябва да обяснява и ефекта от големината на скоростта след промяната. Изглежда, че механизмът за различаване на посока на движение не е чувствителен към големината на скоростта на движение, което е в съгласие с литературни данни подкрепящи предположението за разделяне и независимост между механизмите на възприятие на посока и на големина на скоростта. За да се обясни ефекта от големината на скоростта след промяната V_2 в нашите експерименти за време на реакция при избор, е необходимо да

се направят специфични допускания относно пространствено-времевите характеристики на детекторите за посока и ориентация. Отговорът на механизмите за ориентация би трябвало да е по-силен при по-високи скорости, което е в съответствие с психофизичните данни на различни автори за подобряване изпълнението на задачи за откриване и за различаване при по-висока скорост. Тогава, не е толкова удивително, че движения с високи скорости също така и по-бързо се различават, както ние показахме. Но, поне до момента, въз основа на познанията за свойствата на невронните механизми, които отговарят на посока на движение, изглежда не може да се изгради добре обосновано обяснение защо времето на реакция при избор е функция единствено на нормалната компонента на промяната.

ИЗВОДИ И ПРИНОСИ

1. Два обособени перцептивни механизма управляват откриването и различаването на промени на посоката на зрително движение. Те ползват различни аспекти на информацията за движение.

2. При промяна на посоката на движение механизмите работят паралелно и дори се конкурират един с друг, което води до приблизително еднакви времена на проста реакция и на реакция при избор към много малки ъгли на промяна.

3. Опитите с комплексни промени на движението, по посока и по скорост, потвърждават хипотезата, че простата реакция и реакцията на избор се управляват от различни перцептивни механизми.

4. При комплексни промени на движението фактът, че реакцията на избор е по-бавна от простата реакция, не осигурява доказателство за последователност на двата процеса. Процесът на проста реакция ползва по-голямо количество входна информация, определена от два признака на промяната на движението, и затова е по-бърз от процеса на реакция на избор, който се опира само на един единствен признак на промяната.

5. Когато настъпва промяна на движението, както по скорост, така и по посока, зрителната система извлича два признака на промяната, колинеарна и нормална компонента. Нормалната компонента отразява колко бързо точките от конфигурацията се отдалечават от началното направление на движението. Колинеарната компонента отразява увеличаването на разликата между реалната позиция на точките и позицията, която биха заели, ако движението продължава без промяна. Тя се извлича вероятно чрез процес на “субтрактивна нормализация”. Двете компоненти на промяната дават входна информация за механизмите на проста реакция и на реакция при избор. Тези компоненти се използват по различен начин при изпълнението на двете реакции.

6. Бързината на реакция към промени на движението се описва с Пиеронова функция със сила на стимула изразена с големината на претеглената сума от признаците на промяната. При изпълнение на проста реакция, и двата признака определят времето на реакция, като зрителната система “счита” признака колинеарна компонента за по-маловажен от нормалната компонента. Времето на реакция се скъсява при по-висока начална скорост.

7. При изпълнение на реакция на избор признакът колинеарна компонента се игнорира напълно. Времето на реакция не зависи от началното движение и се определя единствено от нормалната компонента на промяната.

Публикации във връзка с дисертацията

1. Mateeff, S. **Genova, B.**, & Hohnsbein, J. (1999). The simple reaction time to changes in direction of visual motion. *Experimental Brain Research* 124, 391-394.
2. **Genova, B.**, Mateeff, S., Bonnet, C., & Hohnsbein, J. (2000). Mechanisms of simple and choice reaction to changes in direction of visual motion. *Vision Research*, 40, 3049-3058.
3. Mateeff, S., **Genova, B.**, & Hohnsbein, J. (2003). The visual analysis of motion changes: a reaction time study. Proceedings of Symposium “Progress of (self)motion research”, dedicated to A.H. Wertheim. Soesterberg: *TNO Human factors*, pp. 53-64.
4. Mateeff, S., **Genova, B.**, & Hohnsbein, J. (2005). Visual analysis of changes of motion in reaction time tasks. *Perception* 34 (3) 341-356.
5. **Генова, Б.**, Матеев, С., & Хонсбайн, Й. (2008). Фактори, които определят времето на реакция към промени на зрително движение. *Българско списание по психология*, 2008, брой 1-4, стр. 608-614.

Научни съобщения във връзка с дисертацията

1. Mateeff, S. **Genova, B.**, & Hohnsbein, J. (1998). Simple and choice reaction times to changes in direction of visual motion. *Perception*, 27 (Suppl.), 194a
2. Hohnsbein, J, **Genova, B.**, & Mateeff, S. (1999). Detection and discrimination of changes in direction of visual motion: a reaction time study. *Pflügers Archiv*, (Suppl.) 437, R136, P-22
3. **Genova, B.**, Mateeff, S., Hohnsbein, J., & Bonnet, C. (1999). The time of reaction to changes in direction of visual motion. *Acta Physiologica et Pharmacologica Bulgarica* 24, 9
4. **Генова, Б.**, Матеев, С., Hohnsbein, J., & Bonnet, C. (1999). Време на реакция на промени на посоката на движение на зрителни стимули. VII конгрес на Българското дружество по физиологични науки, 10–11 юни, 1999, София
5. Mateeff, S., **Genova, B.**, & Hohnsbein, J. (2002). Reaction times to changes in the velocity vector of visual motion. *Perception* 31 (Suppl.): 38b
6. **Genova, B.**, Mateeff, S., & Hohnsbein, J. (2003). Simple and choice reaction time to changes in the vector of visual motion. *Acta Physiol Pharmacol Bulg* 27, 11

7. **Генова, Б., Матеев, С., & Hohnsbein, J. (2003).** Време на проста реакция и реакция на избор към промени на вектора на зрително движение. VIII конгрес на Българското дружество по физиологични науки, 20–21 юни, 2003, София

8. **Genova, B., Mateeff, S., & Hohnsbein, J. (2007).** The visual perception of motion changes: a simple and choice reaction time study. Balkan Regional Scientific Workshop on Visual Perception, 28.05.2007 - 29.05.2007, Sofia

9. **Генова, Б., Матеев, С., & Хонсбайн, Й. (2008).** Фактори, които определят времето на реакция към промени на зрително движение. Пети Национален конгрес по психология, 31.10.2008 – 02.11.2008, София

10. **Генова, Б., Матеев, С., & Хонсбайн, Й. (2009).** Време на реакция към промени на вектора на зрително движение. Юбилейна научна сесия в памет и по случай 80 годишнината на видните български физиолози А. Гидиков, А. Пенчев и С. Белчева, 27.05.2009, София

Цитирания на публикации във връзка с дисертацията

Mateeff, S., Genova, B., & Hohnsbein, J. (1999). The simple reaction time to changes in direction of visual motion. *Experimental Brain Research*, (3) 391-394

1. Kreegipuu, K., & Allik, J. (2007). Detection of motion onset and offset: Reaction time and visual evoked potential analysis. *Psychological Research*, 71(6), 703-708.

2. Amano, K., Johnston, A., & Nishida, S. (2007). Two mechanisms underlying the effect of angle of motion direction change on colour-motion asynchrony. *Vision Research*, 47(5), 687-705.

3. Marini, A. M., Ars, J. F., Ferrer, S. E., & Bonnet, C. (2004). Reaction time: From chronoscope to wave theory. [Tiempo de reacción: Del cronoscopio a la teoría de ondas] *Psicothema*, 16(1), 149-155.

4. Kawakami, O., Kaneoke, Y., Maruyama, K., Kakigi, R., Okada, T., Sadato, N., & Yonekura, Y. (2002). Visual detection of motion speed in humans: Spatiotemporal analysis by fMRI and MEG. *Human Brain Mapping*, 16(2), 104-118.

5. Whitney, D., Cavanagha, P., & Murakami, I. (2000). Temporal facilitation for moving stimuli is independent of changes in direction. *Vision Research*, 40(28), 3829-3839.

6. Sekuler R., Watamaniuk S. and Blake R. (2001) *Perception of visual motion*. In Stevens' Handbook of Experimental Psychology, 3e Hal Pashler, Series editor, Steve Yantis, Volume editor J. Wiley Publishers, New York

Genova B., Mateeff S., Bonnet C., & Hohnsbein J. (2000). Mechanisms of simple and choice reaction to changes in direction of visual motion, *Vision Research*, 40(22) 3049-3058

1. Whitaker, D. J., Levi, D. M., & Kennedy, G. J. (2008). Integration across time determines path deviation discrimination for moving objects. *PLoS ONE*, 3(4)

2. Juodzbalienė, V., & Muckus, K. (2006) The influence of the degree of visual impairment on psychomotor reaction and equilibrium maintenance of adolescents. *Medicina* 2006; 42(1):49-56.

3. An investigation of human capability to predict the future location of objects in motion. A dissertation presented to the Academic Faculty by Nicholas J. Kelling In Partial Fulfilment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in the School of Psychology Georgia Institute of Technology, May, 2009

Mateeff, S., Genova, B., & Hohnsbein, J. (2005). Visual analysis of changes in motion in reaction-time tasks. *Perception*, 34, 341-356

1. Tayama T. & Tandoh, K. (2008) The Influence of Velocity on the Detection and Prediction of Changes in Color and Motion Direction. *Journal of the Graduate School of Letters*; eprints.lib.hokudai.ac.jp

2. An investigation of human capability to predict the future location of objects in motion. A dissertation presented to the Academic Faculty by Nicholas J. Kelling In Partial Fulfilment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in the School of Psychology Georgia Institute of Technology, May, 2009