

# Интеллектуальная роботроника

Курс лекций, семинаров и лабораторных работ  
“Сенсорные и управляющие системы роботов”

МГТУ “СТАНКИН”, кафедра «Сенсорные и  
управляющие системы» (СиУС) при Институте  
прикладной математики им.М.В.Келдыша РАН

Андреев Виктор Павлович, профессор, д.т.н.

Москва, 2022г.

## «Интеллектуальная роботроника»

Наука и практика разработки, производства и применения человеко-машинных, робототехнических систем (промышленных и сервисных), функционирование которых базируется на сенсорных и управляющих системах с элементами искусственного интеллекта и на распределённых микроэлектронных программно-аппаратных средствах

### Участники:

Российская Инженерная Академия

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Московский государственный технологический университет «Станкин»  
(кафедра «Сенсорные и управляющие системы» при ИПМ им.Келдыша РАН)

Международная лаборатория «Сенсорика»

Международный институт новых образовательных технологий РГГУ

# **“ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТРОНИКА”**

## **Сенсорные и управляющие системы роботов**

### **Тема 3 (Лекция 6)**

## **Сенсорные системы роботов**

### **Зрение человека и система технического зрения (СТЗ)**

1. Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения. – М.: Наука, 1965.
2. Лебедев Д. Г. Анализ работы сетчатки, выделяющей контурный сигнал // Биофизика. – 1981 – Т. 26, вып. 5. – С. 860–863.
3. Андреев В.П., Ким В.Л., Кувшинов С.В. и др. Интеллектуальная роботроника. Проектно-исследовательская деятельность учащихся и студентов с использованием модульных коллаборативных робототехнических систем // Учебно-методическое пособие для организации дополнительного образования. – М. : Изд-во «ОнтоПринт», 2020. – 424 с. (Библ. СТАНКИН).
4. <http://proxy.uniar.ru/RGGU/Files/Data/69ad8073-3e2a-47e7-8ce8-6370b4d3ccf0/index.htm> .

# Зрение человека и СТЗ

## 5 органов ЧУВСТВ человека



6-й орган чувств — вестибулярный аппарат (чувство равновесия и положения в пространстве, ощущение ускорения и веса)

# Зрение человека и СТЗ

## Восприятие через раздражение

### ЧЕЛОВЕК

Информация о раздражителях, воздействующих на рецепторы органов чувств человека, передаётся одновременно по множеству каналов – нервов в центральную нервную систему – мозг. Там выполняется анализ поступающей информации и её идентификация одновременно множеством нейронов через синаптические связи (возникают ощущения). Реализуется параллельная обработка информации.

Параллельного действия

### РОБОТ

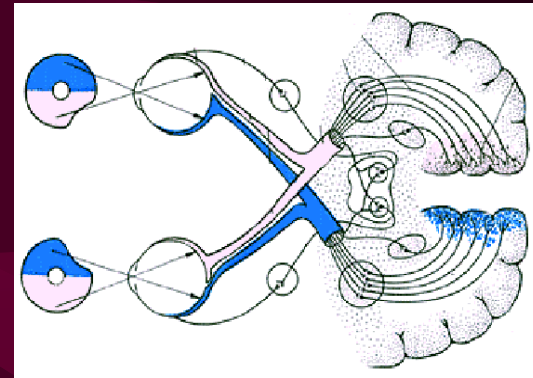
Информация о раздражителях, воздействующих на датчики, установленные на роботе (сенсорная система робота), поступают одновременно по множеству каналов в вычислительное устройство – компьютер или микропроцессор. Но там последовательно команда за командой в соответствии с алгоритмом выполняется анализ поступающей информации и её идентификация.

Последовательного  
действия

# Зрение человека и СТЗ

## Глаз человека и СТЗ

Система параллельного действия – аналоговая система получения, передачи и обработки зрительной информации. От множества рецепторов сетчатки аналоговый сигнал одновременно поступает в нейронную сеть мозга, в которой параллельно через взаимосвязи между нейронами происходит обработка информации.



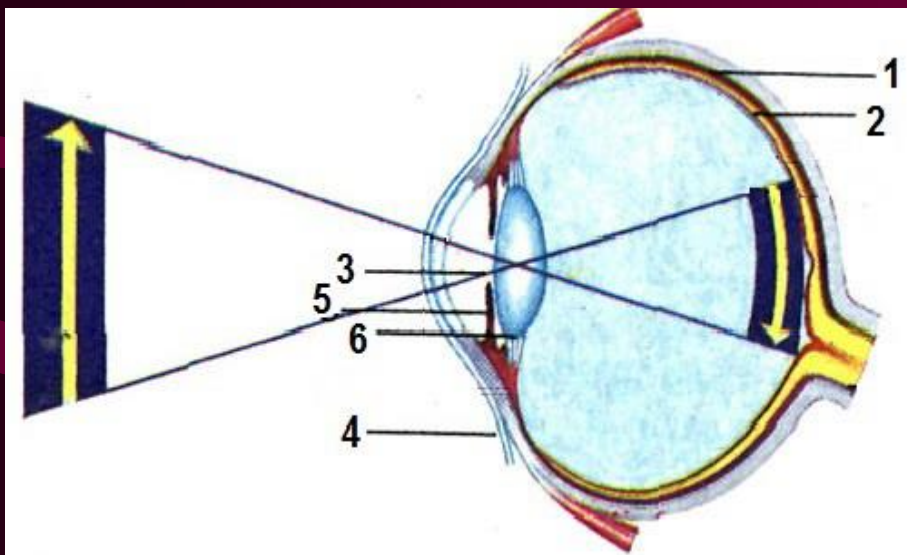
Система последовательного действия – цифровая система получения, передачи и обработки видео-информации. От множества фотоэлементов матрицы информация в виде отсчётов аналогового сигнала последовательно поступает на выход видеокамеры, последовательно преобразуется в цифровую форму с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и последовательно передаётся в память компьютера, в котором последовательно происходит обработка информации. В результате **разрушается структура изображения** (взаимосвязи между частями изображения – пикселями).



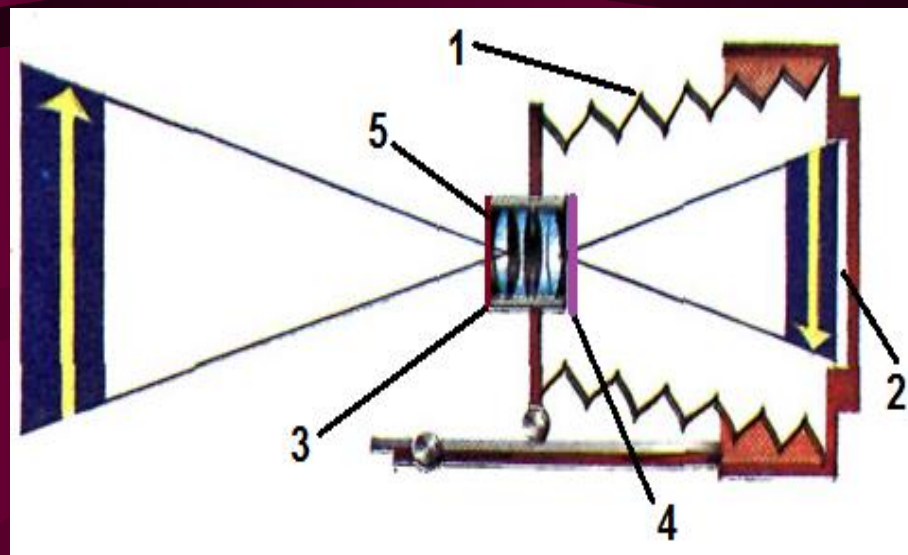


# Зрение человека и СТЗ

## Глаз человека и фотоаппарат



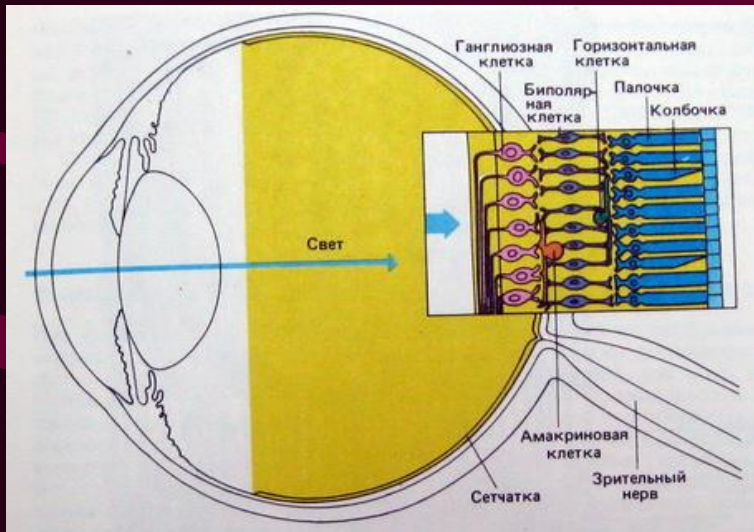
- 1 — склера
  - 2 — сетчатка
  - 3 — хрусталик
  - 4 — роговица
  - 5 — радужная оболочка
  - 6 — цилиарная мышца  
(управляет кривизной хрусталика)
- } объектив



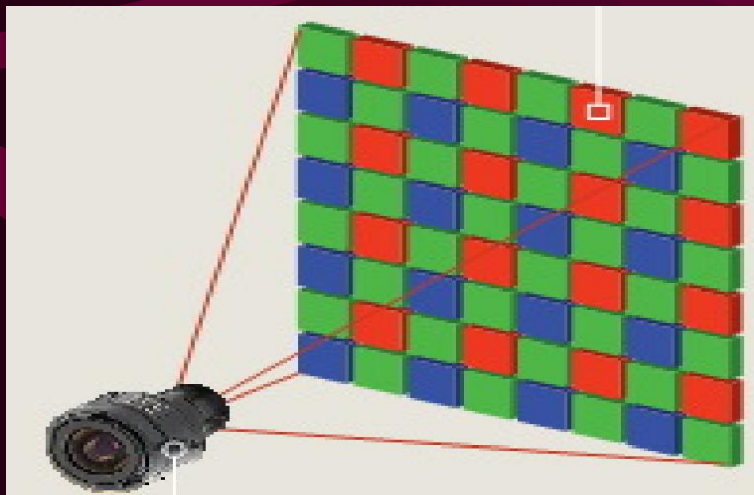
- 1 — непрозрачная камера
- 2 — фотоматрица  
(фотоплёнка)
- 3 — объектив (одна или  
несколько линз)
- 4 — затвор
- 5 — диафрагма

# Зрение человека и СТЗ

## Сетчатка и фотоматрица



Сетчатка глаза состоит из чувствительных к свету элементов — «палочек» и «колбочек» (цвет), отличающихся друг от друга функцией, размерами и формой, и распределены они по сетчатке неравномерно.



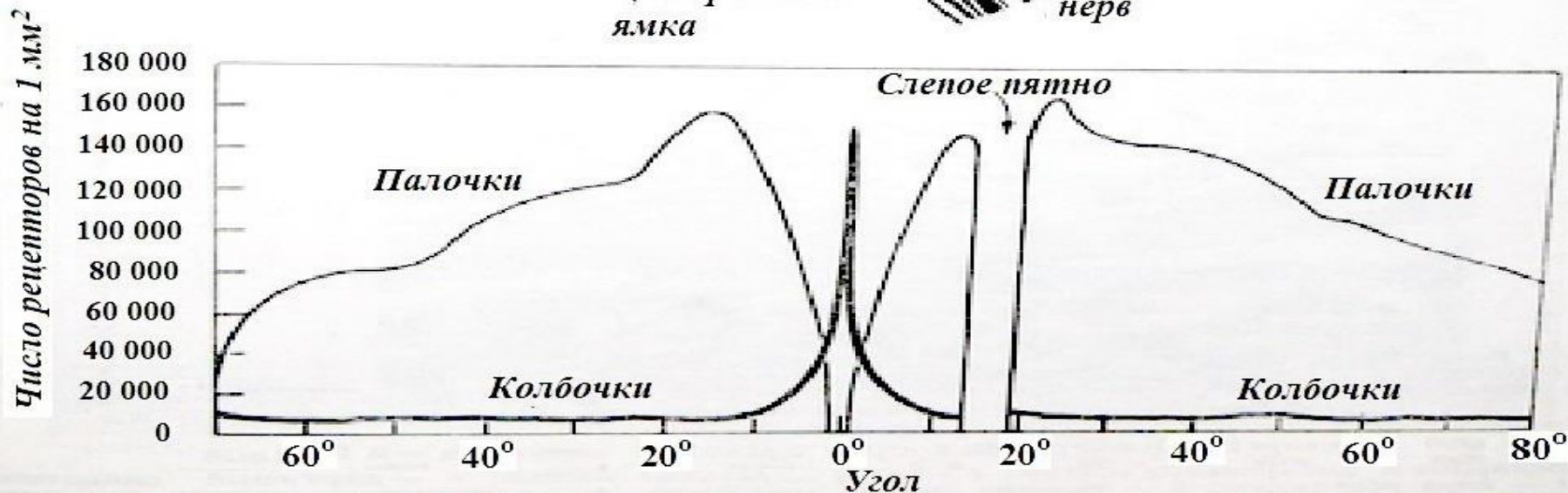
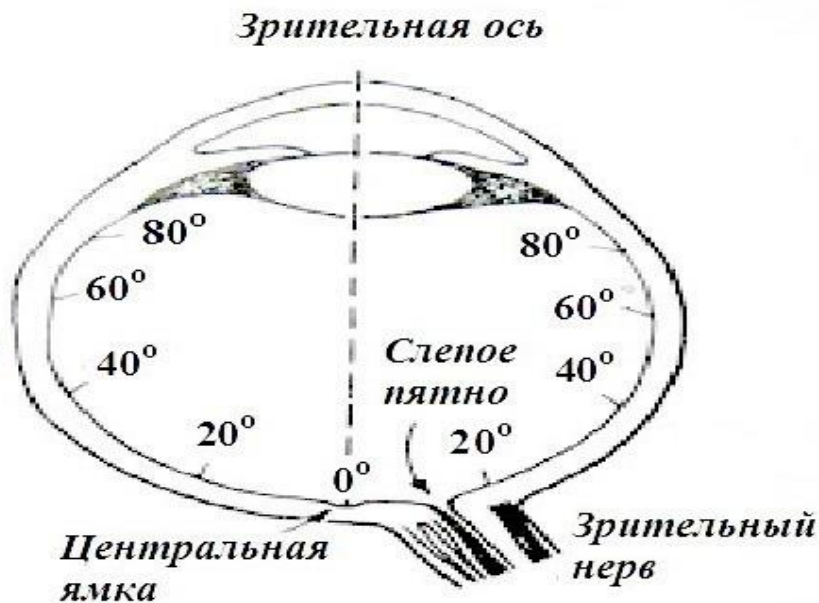
Чувствительные к свету элементы фотоматрицы функционально, по размеру и по форме все одинаковы, и распределены они равномерно на прямоугольной сетке.



# Зрение человека и СТЗ

## Распределение рецепторов в глазу человека

Палочек ~ 130 млн.  
Колбочек ~ 7 млн.  
Ганглиозных клеток ~ 1 млн.  
Центральная ямка (фовеа-область) ~  $\Phi$  0,4 мм ( $1,3^\circ$ )  
Жёлтое пятно ~  $6 - 7^\circ$   
(преимущественно колбочки)



# Зрение человека и СТЗ

## Распределение рецепторов в глазу человека

Рецепторы в глазу человека распределены неравномерно. В центральной ямке (фовеа-область) плотность колбочек, которые ответственны за цветное зрение, максимальна и, соответственно, максимальна разрешающая способность зрения. В пределах «жёлтого пятна» колбочки ещё есть, а далее их плотность очень маленькая. В то же время, в фовеа-области практически нет палочек, которые отвечают только за яркостную составляющую, но их плотность высока на периферии сетчатки. При достаточно высокой яркости работают колбочки, при низкой — колбочки перестают работать, но включаются палочки — цветовые ощущения существенно снижаются, но повышается чувствительность. Чувствительность повышается за счёт обработки сигналов сразу от группы палочек — получается фильтрация шумов за счёт некоторого усреднения сигналов; назовём это «кустованием». В фовеа-области в мозг идёт нерв (ганглиозная клетка) от каждой колбочки, а на периферии — от каждого «куста»; причём чем дальше к периферии, тем больше палочек в «кусте». В результате от фовеа-области к периферии снижается разрешающая способность, но повышается чувствительность. «Слепое пятно» соответствует месту выхода зрительного нерва и здесь нет рецепторов.

# Зрение человека и СТЗ

## Микродвижения глаз человека

**Дрейф** – неупорядоченное и относительно медленное ( $\sim 6$  угл.мин/сек) движение осей глаз, при котором для каждого глаза изображение точки фиксации остаётся внутри фовеа-области. Дрейф для каждого глаза в любых ситуациях протекает независимо и всегда сопровождается **тремором**.

**Тремор** – высокочастотные и очень маленькие по амплитуде колебательные движения осей глаз ( $30 \div 90$  Гц)

**Саккады** – маленькие непроизвольные скачки. Обычно возникают в условиях, когда вследствие дрейфа изображение точки фиксации слишком удаляется от центра фовеа-области или когда продолжительность фиксации взора становится больше некоторого отрезка времени ( $0,3 \div 0,5$  с.). Скачки обоих глаз совпадают по времени, величине и направлению.

# Зрение человека и СТЗ

## Эффект образования пустого поля



Если рассматриваемый объект закреплён на глазном яблоке (например, с помощью присоски), то его проекция на сетчатке будет неподвижна. В результате на рецепторах отсутствует изменение яркости. Таким образом устраняется действие дрейфа на сетчаточную проекцию.

Спустя  $1 \div 2$  сек. после посадки присоски на глаз, наблюдатель видит однородный серый фон — так называемое пустое поле. Пустое поле не имеет собственного цвета.

***Пустое поле соответствует отсутствию сигнала (эквивалент: значение эл. сигнала = 0). Чёрный цвет соответствует сигналу об отсутствии цвета (эквивалент: значение эл. сигнала  $\ll 0$ ).***

# Зрение человека и СТЗ

## Критическая частота слияния мельканий

Наличие зрительной инерции в виде последовательного образа позволяет глазу воспринимать мигающий источник света как непрерывно светящийся, если частота мельканий возрастает до определённого уровня. Наименьшая частота, необходимая для этого, называется **критической частотой слияния мельканий (КЧСМ)**.

При малой частоте мельканий человек видит серию отдельных вспышек света (2 Гц – см. рис.), с увеличением частоты (5, 10, 20, 40 Гц) появляется ощущение мерцания, и, наконец, при максимальной частоте мельканий (>50 Гц) наступает видение непрерывного равномерного свечения.

**КЧСМ** не зависит от остроты зрения, размера зрачка, но для центральной зоны сетчатки она выше, чем для периферии и составляет соответственно  $n = 40 \div 55$  Гц и  $35 \div 40$  Гц. **Закон Ферри-Портера:**

$$n = a \cdot \lg I + b \quad (a \approx 12; b \approx 35; I - \text{кд/м}^2)$$

> 50 Гц

40 Гц

20 Гц

10 Гц

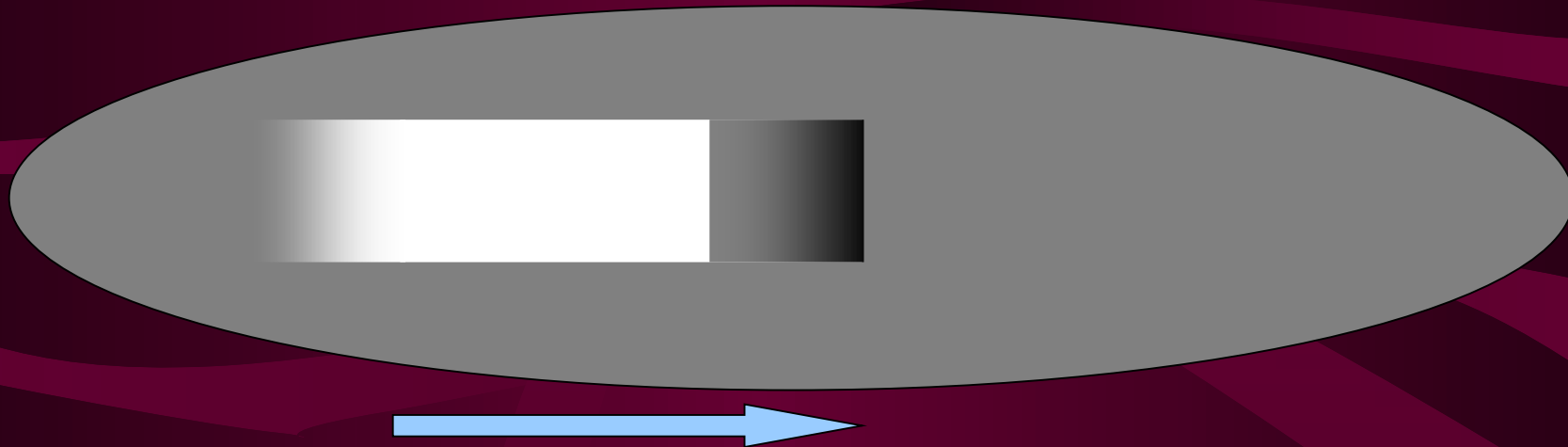
5 Гц

2 Гц



# Зрение человека и СТЗ

## Эффект образования “комет”



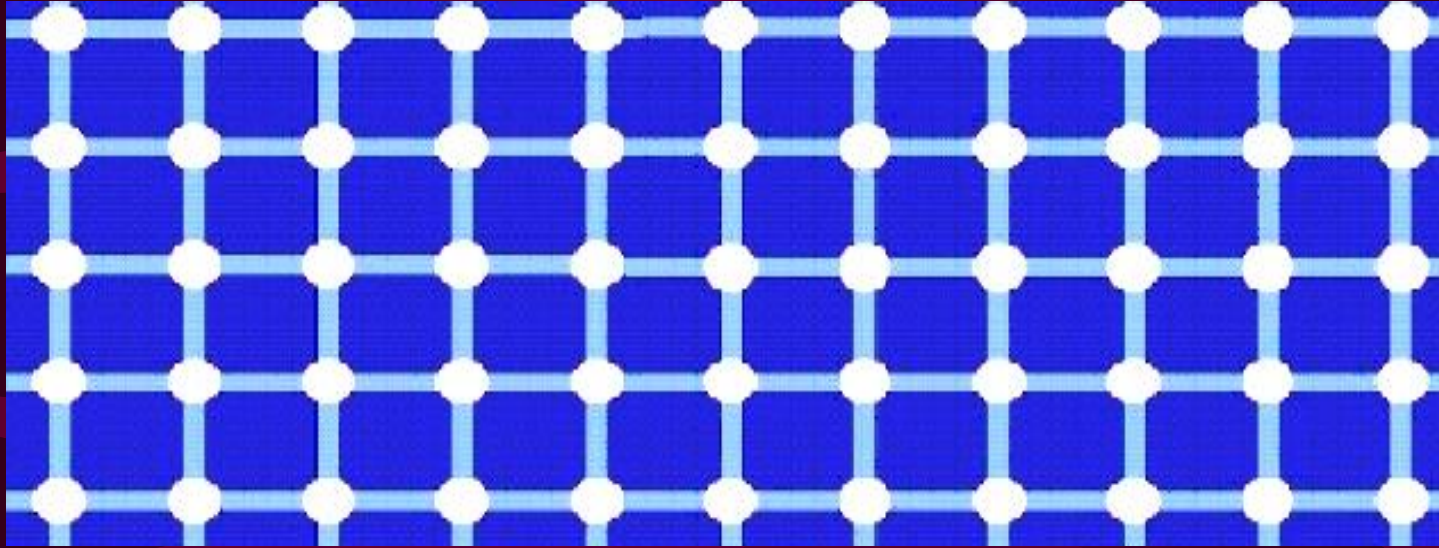
Затухание хвоста при движении примерно равно времени образования **пустого поля**.

Искусственный дрейф, в отличие от естественного, замечен испытуемому (он видит “кометы” движущимися).

Искусственный дрейф, в отличие от естественного, не восстанавливает первоначального изображения — наблюдатель видит не сам светлый прямоугольник, а только «хвосты» (“кометы”) от движущихся границ.

# Зрение человека и СТЗ

## Инерционность восприятия света



**Инерция зрения** — это запаздывание зрительной реакции относительно реально движущегося предмета.

Рецепторы сетчатки обладают инерционностью восприятия света, которая характеризуется **функцией затухания**:

$$A(t) = e^{-t/\tau}, \quad (\tau \approx 0,05\text{с}).$$

Если на сетчатке было некоторое установившееся значение освещённости, то при снятии воздействия впечатление сохраняется ещё некоторое время, убывая по закону экспоненты (вечером, когда смотрите телевизор, резко смените взгляд в темную сторону комнаты).

# Зрение человека и СТЗ

## Обработка сигнала в сетчатке глаза

Разнообразные опыты со стабилизацией сетчаточного изображения позволяют с уверенностью сказать, что в целом глаз работает как дифференциальный анализатор.

Своеобразие заполнения пустых полей указывает на вид контурного сигнала — он должен быть похож на Лапласиан.

Поэтому обработка сигнала схематично выглядит так:

сначала выделяется контурный сигнал, соответствующий краям объектов на изображении, для чего используется движение сетчаточной проекции вследствие дрейфа зрительных осей глаз,

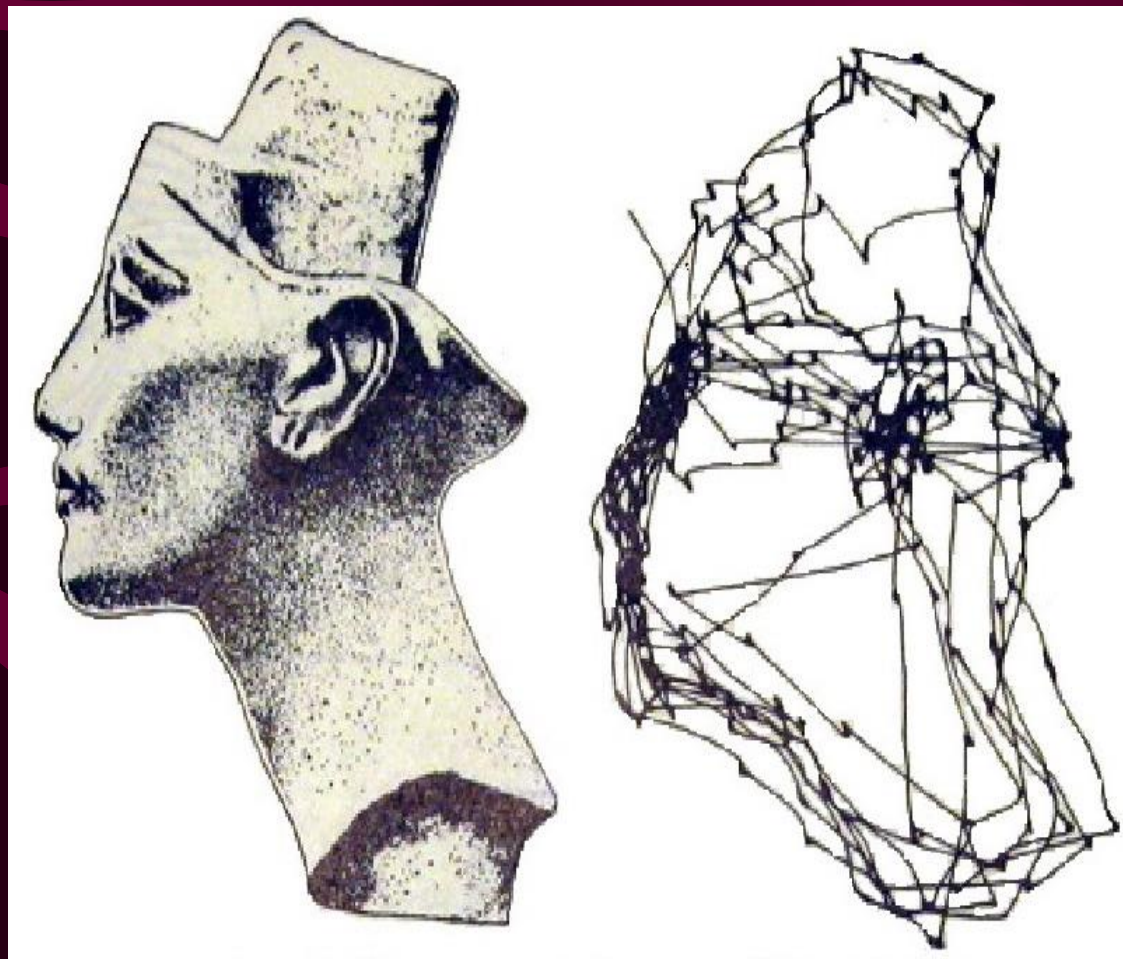
затем происходит заполнение пустых полей, которое можно представить как интегрирование по пространству.

Доказательство — на следующем слайде. Фовеа-областью на изображении выделяются места с резким перепадом яркости (контурный сигнал), затем выполняется заполнение относительно однородных участков изображения (заполнение пустых полей), предположительно на основании данных от рецепторов фовеа-области и периферийных рецепторов глаза.

# Зрение человека и СТЗ

## Движение глаз при рассматривании

Опыт Ярбуса: При осмотре какого-либо объекта в движениях глаз обнаруживаются определённые закономерности:



при анализе записи движений глаз испытуемого создаётся впечатление, что путь движения взора образует довольно правильные циклы (глаз «сканирует» фовеа-областью участки с резким перепадом яркости), а не пересекает фигуру в различных случайных направлениях. Проекция остальных участков изображения оказывается на периферии сетчатки.



# Зрение человека и СТЗ

## Закон Вебера-Фехнера

В ряде экспериментов (начиная с 1834 года) Э. Вебер показал, что новый раздражитель, чтобы отличаться по ощущениям от предыдущего, должен отличаться от исходного на величину, пропорциональную исходному раздражителю. Так, чтобы два предмета воспринимались как различные по весу, их вес должен различаться на  $1/30$ , а не на  $x$  грамм. Для различения двух источников света по яркости необходимо, чтобы их яркость отличалась на  $1/100$ , а не на  $x$  люмен и т. д.

На основе этих наблюдений Г. Фехнер в 1860 году сформулировал эмпирический «основной психофизиологический закон»:

*интенсивность ощущения  $A$  пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя  $S$  :*

$$A = k \cdot \ln(S/S_0),$$

где  $S_0$  — нижнее граничное значение интенсивности раздражителя (если  $S < S_0$ , раздражитель совсем не ощущается);

$k$  — константа, зависящая от субъекта ощущения.



# Зрение человека и СТЗ

## Константность восприятия

**Константность** — постоянство восприятия одного и того же дистального объекта при изменении проксимального стимула, способность распознавать один и тот же объект на основе различающейся сенсорной информации (ощущений).

Воспринимаемый в различных обстоятельствах и условиях объект рассматривается как один и тот же. Так, яркость объекта, как величина, характеризующая отражённый свет, изменяется, если переместить его из слабо освещённой комнаты в комнату с хорошим освещением. Тем не менее объект при изменении проксимальной (стимульной) информации в обоих случаях видится как один и тот же.

Можно выделить константность таких свойств объекта как размер, форма, яркость, цвет.

**Пример:** Белая рубашка будет восприниматься человеком как белая при любых внешних условиях освещения (днём на фоне зелёного леса или на закате солнца на море), в то время, как отражённый от рубашки свет будет иметь разный спектр.

# Зрение человека и СТЗ

## Латеральное торможение

Латеральное торможение — отношение между нервными клетками, когда возбуждение одного нейрона приводит к торможению активности другого нейрона. Сложные системы латерального торможения ответственны, как установлено, за остроту восприятия, особенно зрительного.

### Пространственный способ вычисления Лапласиана:

В каждом пикселе цифрового изображения вычисляется значение лапласиана  $L_{i,j}$ :

$$L_{i,j} = E_{i,j} - \frac{1}{8} \sum_{k,l \neq i,j} E_{k,l}$$

Выполняется «свёртка» отсчётов яркости  $E_{i,j}$  на фрагменте с маской разностного лапласиана.

$$E_{i,j} = K_{i,j} \times B_{i,j}, \text{ где}$$

$B_{i,j}$  — значение яркости оптического изображения;

$K_{i,j}$  — коэффициент преобразования фотоэлемента матрицы.

-1	-1	-1
-1	+8	-1
-1	-1	-1

Маска разностного

лапласиана

# Зрение человека и СТЗ

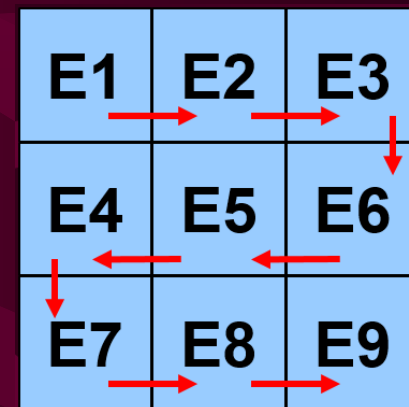
## Искусственный дрейф

### Пространственно-временной способ вычисления лапласиана на изображении:

Организуется искусственный дрейф – покадровое смещение проекции оптического изображения относительно фотоматрицы по траектории, отмеченной стрелками. Тогда каждый фотоэлемент матрицы за 9 кадров «снимет» 9 отсчётов яркости  $E_{i,j}$  на фрагменте (одним и тем же фотоэлементом матрицы), по которым вычисляется Лапласиан.

При данном способе на «контурном» изображении не образуются «ложные» контуры (под контуром понимается граница между областями разной яркости, т.е. там, где  $L_{i,j} \neq 0$ ).

$$L_{i,j} = E_{i,j} - \frac{1}{8} \sum_{k,l \neq i,j} E_{k,l}$$



Фрагмент изображения:  
E1 ... E9 – отсчёты яркости в пикселах изображения на фрагменте.

# Зрение человека и СТЗ

## Преобразование контурного изображения в исходное растровое

$$L_{i,j} = E_{i,j} - \frac{1}{8} \sum_{k,l \neq i,j} E_{k,l}$$

Получим разностный лапласиан:  $L_{i,j} = \bar{A} E_{i,j}^{(0)} = E_{i,j}^{(0)} - A E_{i,j}^{(0)}$ , где  $A$  – оператор однократной расфокусировки, заданный на 8-лучевой диагональной сетке.

Изображение, расфокусированное на  $g$  шагов, получается последовательным применением оператора  $A$ :  $E_{i,j}^{(g)} = A \left[ A \dots \left( A E_{i,j}^{(0)} \right) \right] = A^g E_{i,j}^{(0)}$

Приходим к задаче восстановления исходного изображения по контурному  $L_{i,j}$  и по расфокусированному на  $g$  шагов — будем вычислять сумму расфокусированных в разной степени контурных изображений:

$$M_{i,j}^{(g)} = \sum_{n=0}^{g-1} L_{i,j}^{(n)} = \sum_{n=0}^{g-1} A^n \left( E_{i,j}^{(0)} - A E_{i,j}^{(0)} \right) = E_{i,j}^{(0)} - A^g E_{i,j}^{(0)}$$

и суммировать результат с расфокусированным изображением:

$$M_{i,j}^{(g)} + E_{i,j}^{(g)} = E_{i,j}^{(0)} - A^g E_{i,j}^{(0)} + A^g E_{i,j}^{(0)} = E_{i,j}^{(0)}$$

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Оператор  
 $A$

# Зрение человека и СТЗ

## Контрастная чувствительность зрения

**Контрастная чувствительность** — способность человека видеть объекты, слабо отличающиеся по яркости от фона.

Контрастная чувствительность зависит от размеров детали изображения. Если изображение состоит из объекта большого размера постоянной яркости  $B_g$ , расположенного на фоне постоянной яркости  $B_f$ , то для порогового контраста  $\alpha$  имеем:

$$\alpha = (B_g - B_f) / B_f$$

В соответствии с законом Вебера-Фехнера  $\alpha$  имеет величину порядка  $0,015 \div 0,02$ . Эта оценка справедлива только тогда, когда угловые размеры рассматриваемых объектов достаточно велики. При уменьшении размеров пороговый контраст возрастает более чем на порядок. Так, для обнаружения мелкой детали изображения размером в 2 угловые минуты требуется 40%-й контраст этой детали с окружающим фоном.



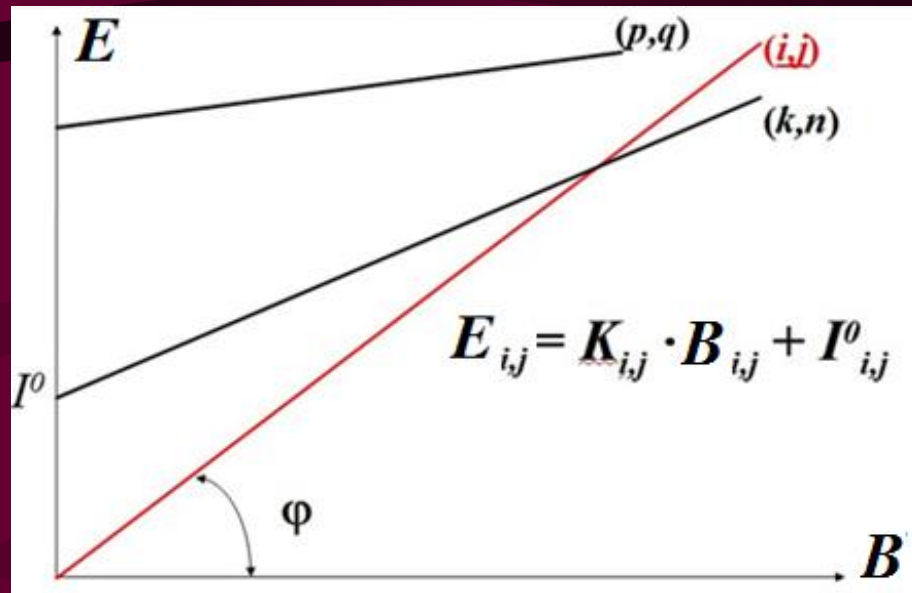
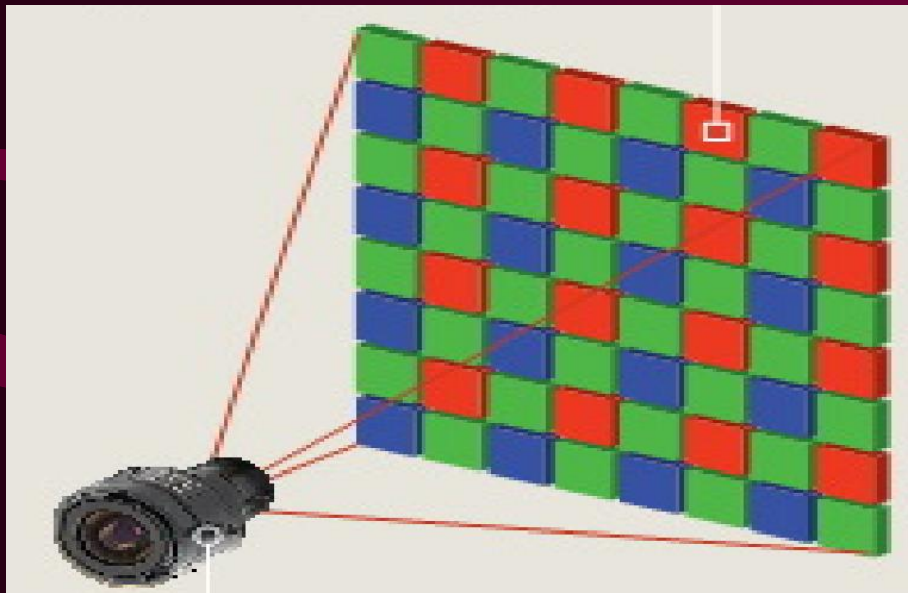
# Зрение человека и СТЗ

## Вопросы при создании СТЗ

- Почему при неоднородном строении сетчатки глаза и почти сферической форме мы видим пространство неискажённым
- Почему человеческий глаз не сканирует сцену, а рассматривает её посредством фиксации взора на неких информативных точках, и как определяются эти информативные точки
- Почему природа или «Господь Бог» сделали так, что глаз человека видит только, если он движется (приматы)
- Почему при стольких движениях глаз в зрительной системе человека воспринимаемое изображение ощущается стабильным
- Почему мы вынуждены создавать сложнейшие объективы со многими линзами, а глаз обходится только роговицей и хрусталиком
- Природа не может создавать абсолютно одинаковые биологические элементы. Тогда почему при неодинаковых по параметрам колбочках и палочках мы не замечаем этот дефект

# Зрение человека и СТЗ

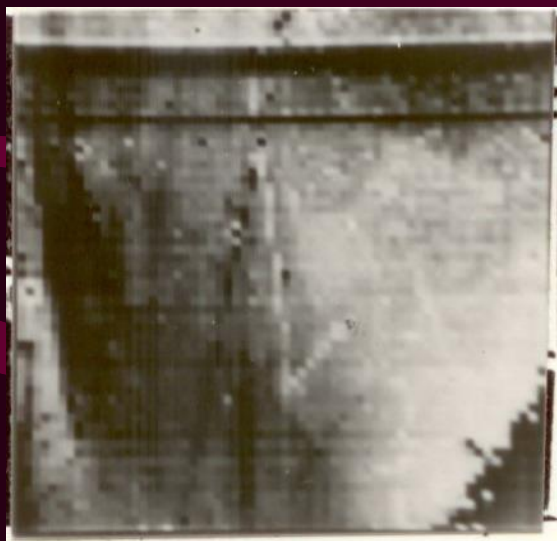
## Разброс параметров элементов фотоматрицы



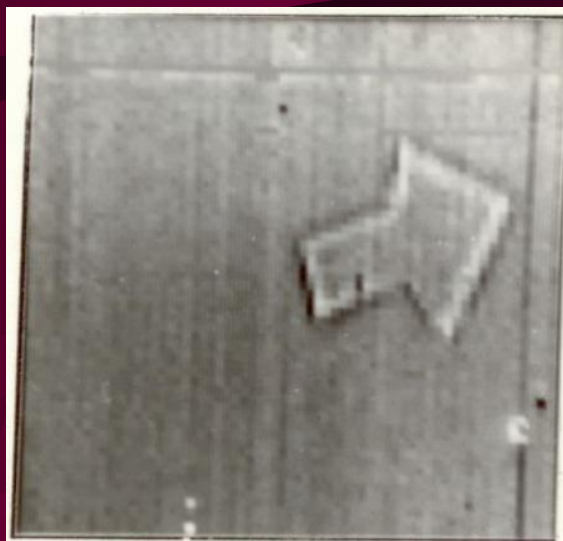
Геометрическим шумом принято называть неравномерность видеосигнала многоэлементного приёмника излучения, вызванная несоответствием выходного сигнала  $E_{ij}$  потоку излучения  $B_{ij}$ , которая возникает вследствие разброса значений чувствительности  $\{K\}$  и значений темновой составляющей  $\{I^0\}$  фотоэлементов  $\{i, j\}$ .

# Зрение человека и СТЗ

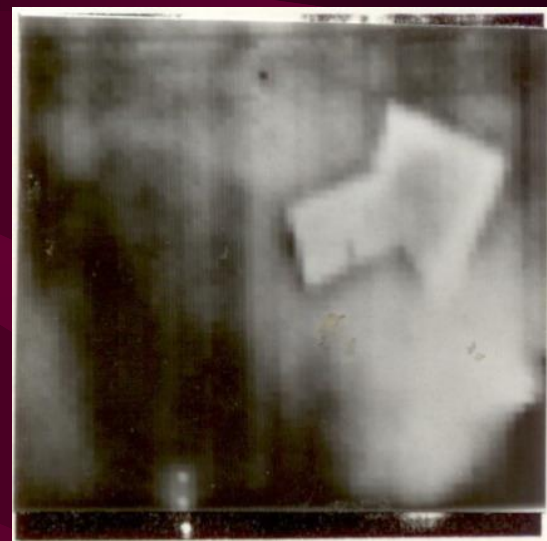
## Использование дрейфа осей глаз в СТЗ



а)



б)



с)

- а) Цифровое изображение объекта, полученное обычным считыванием видеосигнала с реальной ИК-фотоматрицы ( $\lambda = 3\text{мкм}$ , формат  $64 \times 64$  пикселей) – объект не виден из-за большого геометрического шума.
- б) Высокочастотная компонента (лапласиан – контурное изображение), выделенная в процессе управляемого движения (дрейфа) проекции оптического изображения относительно поля фотоматрицы (слайд 21).
- с) Результирующее синтезированное изображение (слайд 22)

# “ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТРОНИКА”

Сенсорные и управляющие системы роботов

Тема 3

Сенсорные системы роботов: зрение человека и  
система технического зрения (СТЗ)

ВОПРОСЫ?

Андреев Виктор Павлович, профессор, д.т.н.

*andreevvipa@yandex.ru*

Москва, 2022г.