

УДК 519.876.5

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНЕШНИХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ СЕНСОРНОГО ПОТОКА, ВЫЗВАННОГО СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЖИВОТНОГО

© 2012 г. Д. Н. Лапшин, А. А. Лукьяница

*Учреждение Российской академии наук
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
127994, Москва, ГСП-4, Б. Каретный пер., 19
E-mail: lapshin@iitp.ru*

Поступила в редакцию 24.03.2011 г.

Все животные неизбежно сталкиваются с проблемой обнаружения биологически значимых сигналов на фоне сенсорных потоков, вызванных собственной локомоцией и жизнедеятельностью (аутошумами). Эта проблема возникла и, по-видимому, была успешно решена ещё на ранних этапах эволюции животного мира. Задача данного исследования заключалась в решении вопроса, при каком минимальном уровне сложности математической нейронной сети возможно эффективное обнаружение внешних сигналов на фоне высокоамплитудных колебаний, вызванных собственным движением животного.

Показано, что на основе информации о движении модельного "животного" (моторной копии), первой и второй производных входного сигнала, предварительно обученная нейронная сеть с числом элементов порядка одного - двух десятков обеспечивает эффективное обнаружение внешних сигналов на фоне действия высокоамплитудных аутошумов.

Ключевые слова: восприятие, локомоция, нейронные сети, моделирование, моторная копия, corollary discharge.

ВВЕДЕНИЕ

Каждый движущийся материальный объект изменяет характеристики физических полей в окружающем пространстве. У животных помехи, вызванные собственным движением или жизнедеятельностью (аутошумы), непосредственно действуют на рецепторные системы и теоретически могут приводить к искажению сенсорного восприятия. Анализ внешней информации при этом усложняется ещё и тем, что аутошумы не являются строго детерминированной функцией моторной активности животного и по амплитуде могут превышать на несколько порядков сигналы из среды.

Проблема выделения животными сигналов на фоне аутошумов была осознана исследователями в середине прошлого века, главным образом, в её наиболее очевидной области - в восприятии зрительной информации на фоне движения глаз

и головы. Постепенно пришло понимание того, что тематика значительно шире и распространяется практически на все типы сенсорных каналов. Исследователи пришли к логичному выводу, что методы, используемые до настоящего времени в физиологии, не учитывают в полной мере динамику функциональных перестроек сенсорных каналов животных в процессе их жизнедеятельности (Лапшин, 2005; Poulet, Hedwig, 2006; 2007).

В ряде работ подробно, на клеточном уровне были изучены схемы нейронного блокирования сенсорного проведения у животных при плавании (Li et al., 2002, 2004) или во время вокализации (Poulet, Hedvig, 2002). Однако эти примеры следует рассматривать как частные случаи, так как при обработке информации в сенсорном канале проблема не сводится к подавлению нейрокоррелятов аутошумов. Решение сходных задач возможно также на основе иных принципов. Например, при восприятии призывных акустических

сигналов летящим сверчком за счёт тонкой подстройки ритма полёта происходит разделение во времени шумовой помехи, сопровождающей каждый взмах крыльями, и информационно важных элементов сигнала (Лапшин, Жантиев, 1992).

Рассмотрение вопроса снижения влияния аутошумов в общем ключе, без привязки к какой-либо сенсорной модальности, позволило выработать обобщённую схему обработки экстрарецепторной информации в центральной нервной системе животного (Poulet, Hedwig, 2007). Такая схема в качестве необходимого элемента включает передачу в сенсорный канал "моторной копии", т.е. информации о локомоторных актах, совершаемых животным, или подготовленных к исполнению. Предполагается, что каждый этап обработки сенсорной информации использует данные о собственном движении животного - так достигается высокая результирующая эффективность выделения информационно значимых компонентов сигнала на фоне возмущений, связанных с локомоцией (в английских текстах используются термины *self-generated* и *reafferent sensory information*). Следует отметить, что влияние моторной копии при обработке сигналов должно быть опережающим по отношению к реальным двигательным актам животного.

Данная схема представляется вполне разумной, однако присутствие в нервной системе обособленных моторных центров и эфферентной регуляции подразумевает эволюционную продвинутость животного и его нервной системы.

Задача снижения влияния аутошумов при восприятии внешних сигналов возникла и, по-видимому, была решена ещё на самых ранних этапах становления животного мира. В процессе эволюции параллельно с другими функциональными системами совершенствовались и алгоритмы выделения сигналов на фоне аутошумов, достигшие на этом пути столь высокого уровня эффективности, что большинство здоровых людей даже не подозревают о существовании такой биологической проблемы. В то же время системы совместной обработки сигналов и аутошумов у рецентных организмов могли сохранить в своей основе базовые принципы, заложенные в геноипе животных ещё на самых ранних этапах биологической эволюции. Возник закономерный вопрос, при каком минимальном уровне сложности нейросетей возможно эффективное обнаружение значимой информации на фоне высокоамплитудных колебаний, вызванных собственным движением животного?

В предлагаемой работе приведены результаты исследования математической нейронной сети с малым числом решающих элементов. Выбор такой модельной структуры определялся тремя основными соображениями:

- практика использования искусственных нейросетей показала их эффективность при анализе недетерминированных сигналов;
- животные с диффузной нейронной сетью распространены повсеместно (например, кишечнополостные), их нейроны образуют синцитий - эта особенность ещё более сближает организацию простых нервных систем с искусственными нейронными сетями;
- следует полагать, что функционирование системы выделения сигнала из аутошумов не должно приводить к подавлению проводимости сенсорного канала во время моторного акта.

При планировании экспериментов исходно подразумевалось, что гипотетическое животное, обладающее очень простой нервной системой (с числом нейронов порядка нескольких десятков), жило в водной среде, было свободноподвижным и в задачу его механосенсорных систем входило обнаружение волн, вызванных движущимися хищниками, потенциальными объектами охоты или конспецифическими особями.

При исследовании математических нейросетевых моделей нами были поставлены следующие вопросы:

- как форма представления информации о внешних сигналах влияет на эффективность работы сети;
- какое минимальное количество нейронов, объединённых в неспециализированную нейронную сеть, способно решить задачу обнаружения внешнего сигнала на фоне возмущений, вызванных собственным движением животного;
- возможно ли обнаружение сигналов с частотно-временными характеристиками, близкими к помехам, порождаемым собственной локомоцией;
- насколько устойчиво работает сеть с периодическими сигналами различной формы.

Решению этих вопросов посвящена предлагаемая работа.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В качестве базовой модели в работе была использована автоассоциативная нейросеть (Хайкин, 2006), которая состояла из двух центрально-

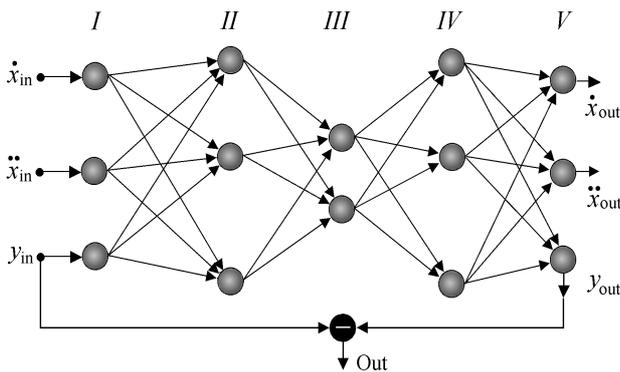


Рис. 1. Схема автоассоциативной нейронной сети. На входы рецепторного слоя *I* поступает информация о первой производной входного сигнала (\dot{x}_{in}), его второй производной (\ddot{x}_{in}) и сигнал (y_{in}), который характеризует движение воспринимающего объекта (моторная копия). На нейронах слоя *V* формируются выходные сигналы сети.

симметричных частей. Количество входов сети (рецепторов, слой *I*) совпадало с количеством выходов (детекторных нейронов, слой *V*) (рис. 1).

Первый этап обработки входной информации осуществлялся на нейронах скрытого слоя *II*. Обе половины сети соединены так называемым "узким горлом" (слой *III*), число нейронов в котором меньше по сравнению со слоем входных рецепторов. При прохождении через "узкое горло" часть информации необратимо терялась, но в результате сохранялись наиболее существенные её составляющие.

Каждый нейрон имел несколько входов, которые характеризовались настраиваемыми весовыми коэффициентами w . В процессе обработки информации в отдельном нейроне вычислялось скалярное произведение входных сигналов x с соответствующими весовыми коэффициентами (w, x). В качестве передаточной функции нейрона была использована сигмоидная функция (Хайкин, 2006), которая наиболее быстро изменяется в окрестности нуля и приближается к единице при увеличении аргумента, либо к нулю - при его уменьшении (*S*-образная кривая). Сходная по форме передаточная функция характерна для биологических нейронов. После преобразования передаточной функцией результирующий сигнал поступал на выход нейрона.

При определении минимально необходимого комплекса входной информации принята гипотеза, что все алгоритмы подавления аутошумов базируются на их высокой коррелированности с моторной программой животного. В этой связи на один из нейронов рецепторного слоя с опереже-

нием относительно аутошума подавался сигнал (y_{in}), характеризовавший механическое движение гипотетического "животного" (моторная копия).

Представление сигналов на входах и выходах рецепторов (нейронов I-го слоя). В работе были приняты следующие определения сигналов:

- "внешний сигнал" содержал информацию о событиях в среде и непосредственно не зависел от активности "животного";
- "входной сигнал" (x_{in}) представлял собой сумму внешнего сигнала и аутошума;
- "аутошум" - составляющая входного сигнала, вызванная движением самого "животного";
- "моторная копия" (y_{in}) характеризовала двигательную активность "животного", воспринимавшего внешние сигналы. Моторная копия не зависела от информации на экстрарецепторных входах.

В ходе пробных вычислений выяснилось, что один экстрарецепторный вход не способен обеспечить сеть информацией, достаточной для её эффективного функционирования в рамках поставленных задач. Наилучшее выделение внешнего сигнала на фоне аутошума при условии минимизации количества нейронов в сети было получено в тех вариантах, когда на рецепторные входы системы (нейроны *I*-го слоя) поступали данные скорости и ускорений (первой и второй производной) входного сигнала.

У реальных животных рецепторы выполняют функцию преобразования физических параметров входного сигнала x_{in} в биопотенциалы. Однако для унификации сетевых нейронов сигналы, полученные в результате такого преобразования, удобнее представить в виде приведённых к входу величин, соответственно, первой производной входного сигнала \dot{x}_{in} и его второй производной \ddot{x}_{in} (рис. 1). Три рецепторных канала, несущие информацию о внешнем сигнале и собственном движении объекта, определили размерность *I*- и *V*-го слоев сети.

Прообразом датчика скоростной составляющей сигнала у архаичного животного могла быть сенсилла, содержащая волосок с механорецептором в основании, реагирующим на колебания волоска. Степень отклонения волоска от положения равновесия зависит от скорости набегающего потока воды или воздуха (Shimozawa, Kanou, 1984). Функция датчика ускорения могла быть реализована также на волосковой сенсилле, но с рецептором, реагирующим только на скорость изменения механического воздействия (фазный тип рецептора).

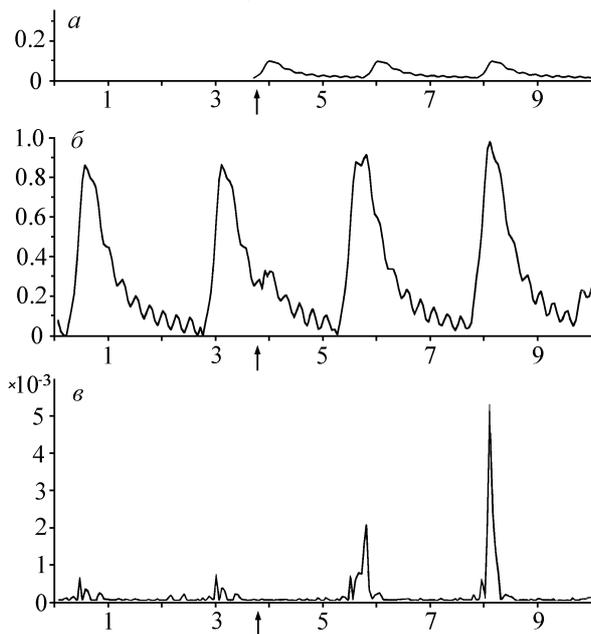


Рис. 2. Осциллограммы внешнего сигнала (а), аутошума в смеси с внешним сигналом (б) и сигнала выхода сети (в).

Начало подачи внешнего сигнала отмечено на осциллограммах стрелками. По горизонтальным осям - время, с; по вертикальным - уровень относительно максимального значения входного сигнала.

Циклическая локомоция модельного "животного" в пределах каждого периода включала фазу мышечного сокращения и более длительную фазу релаксации, на которую накладывались более мелкие колебания (рис. 2). Аутошум на входе рецепторов имел сходную с моторной копией форму, но запаздывал относительно последней на 0.2 с. Время запаздывания не зависело от вариаций периода собственного движения.

Следует отметить, что после дифференцирования форма сигналов, характеризующих составляющую аутошума на выходах рецепторов, существенно отличалась как от входного воздействия, так и функции моторной копии y_{in} , причём эти отличия зависели от темпа локомоции модельного "животного".

В качестве выходного сигнала сети была использована разность $Out = |y_{in} - y_{out}|$ в канале обработки моторной копии (рис. 1). Необходимая для вычисления разности входная и выходная информация этого канала потенциально доступна в нервной системе животного в любой момент времени, однако на выход канала (y_{out}) существенно влияли сигналы на входах \dot{x}_{in} и \ddot{x}_{in} .

Описание модельной задачи. На экстарецепторные входы сети эпизодически действовал сигнал, вызванный активностью конспецифической особи (внешний сигнал), с периодом, меняющимся от 2 до 2.5 с (рис. 2, а). Такой сигнал был использован в качестве тестового как предположительно самый сложный для его выделения на фоне аутошума из-за сходства временных и спектральных параметров обоих сигналов.

Средняя амплитуда колебаний среды, вызванных внешним объектом в точке восприятия, была установлена в 10 раз меньшей уровня аутошума. В процессе локомоции период ритмического движения "животного" постепенно уменьшался с 2.5 до 2 с. Коэффициенты случайных вариаций амплитуды и периода локомоции составляли 0.01 и 0.02 соответственно. Коэффициенты вариаций для тех же параметров внешнего сигнала во всех расчётах приняты равными 0.05.

На рис. 2, б представлен фрагмент осциллограммы суммарного сигнала x_{in} (аутошум + внешний сигнал). Основным компонентом в сумме был аутошум, в то время как появление дополнительного внешнего сигнала (начало указано стрелкой) на графике проявилось в виде небольшого добавочного пика. Последующие проявления внешнего сигнала на осциллограмме x_{in} маскировались высокоамплитудными пиками третьего и четвёртого циклов аутошума.

Алгоритм предварительного обучения сети был основан на случайном изменении величины связей с последующим закреплением достигнутых положительных результатов (Гордиенко, Лукьяница, 1994). Процесс начальной настройки заключался в определении весовых коэффициентов связей между нейронами w таким образом, чтобы при действии тестовых входных сигналов (моторная копия на входе y_{in} и производные аутошума без добавления внешнего сигнала на входах \dot{x}_{in} и \ddot{x}_{in}) на соответствующих выходах нейронов V -го слоя формировались те же сигналы. Точность настройки характеризовалась разностью между выходным и входными сигналами каждого из трёх каналов. В дальнейшем при тестировании модели параметры межнейронных связей в сети не менялись.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2, в приведен фрагмент осциллограммы сигнала выхода нейросети (Out) на интервале времени до - и во время появления на входах внешнего сигнала (рис. 2, а). Реакция нейросети на внешний сигнал в 8 раз (последний пик

на осциллограмме) превышала выбросы неполного подавленного аутошума (ошибку подавления характеризуют первые два пика на осциллограмме до начала предъявления внешнего сигнала). С учётом того, что аутошум на входе сети на порядок превосходил внешний сигнал, соотношение сигнала к шуму в приведённом примере составляло порядка 80. Выход Out при этом характеризовал не внешний сигнал, а факт его появления на входах сети, т.е. происходило обнаружение сигнала. Всплески на выходе сети, инициированные внешним сигналом, во всех реализациях следовали синхронно с ритмом моторной копии (сигналом на входе y_{in}), но с небольшими вариациями фазы.

Анализ реакций сети на модели внешних сигналов другой формы (синусоидальных, шумовых, периодических последовательностей затухающих колебаний) показал еще лучшие результаты в смысле эффективности обнаружения такого рода сигналов на фоне аутошума. Модель оказалась также устойчивой к величине запаздывания аутошума относительно моторной копии.

Варьирование количества нейронов в скрытых слоях показало, что уменьшение их числа во *II* и *IV* слоях приводит к принципиальному ухудшению качества разделения сигналов. В "узком горле" (слой *III*) достаточно двух нейронов, уменьшение их числа до одного также приводило к существенному снижению эффективности сети. Увеличение числа нейронов в скрытых слоях *II* и *IV* до четырёх обеспечивало более глубокое подавление откликов аутошума на выходе сети и, соответственно, более контрастное выделение реакций на внешние сигналы.

Изменение темпа движения "животного" в сторону более медленных ритмов (2-5 с), т.е. за пределы диапазона обучения сети, не принципиально снижало эффективность её функционирования: выходной отклик на внешний сигнал при замедленном ритме движения в 4 раза превышал колебания, связанные с проникновением на выход выбросов неполного подавления аутошума.

Таким образом, на основе информации о скорости и ускорении (первой и второй производной) входного воздействия автоассоциативная нейросеть с малым числом решающих элементов ($3+3+2+3+3 = 14$, с учётом вычитающего элемента на выходе Out - 15) обеспечивала эффективное обнаружение внешних сигналов на фоне высокоамплитудных колебаний, вызванных собственным движением воспринимающего объекта.

ОБСУЖДЕНИЕ

Модельные эксперименты показали, что нейронная сеть с числом элементов порядка одного - двух десятков обеспечивает эффективное обнаружение внешних сигналов на фоне высокоамплитудных возмущений среды, вызванных собственным движением объекта, воспринимающего сигнал. Эффективность работы сети обеспечивается информацией о собственном движении объекта (моторной копии), первой и второй производной (скорости и ускорения) внешнего сигнала. Под эффективностью в данном случае подразумевается высокое превышение над "шумом" (в 4-8 раз) выбросов на выходе сети Out, возникавших в ответ на предъявление внешнего малоамплитудного сигнала. Такое соотношение позволяло надёжно выделять ответ сети пороговым элементом на последующих этапах обработки информации.

Исследованная нами нейросетевая структура успешно "обучалась" подавлять аутошумы как простейшей (синусоидальной) формы, так и сложной, сходной по динамике с локомоторной активностью беспозвоночных.

Выделение информации о внешнем сигнале происходило в сети не путем компенсации влияния аутошума, а за счёт улавливания небольших изменений в процессе совместной циклической обработки "моторной копии" и производных аутошума. Представляется вполне естественным, что все отклонения в характере такой обработки, обусловленные появлением на входах сети коррелятов внешнего сигнала, наблюдались на выходе сети синхронно с основным циклом обработки, т.е. моторным ритмом.

Вход сети, получающий информацию о собственном движении воспринимающего сигнал объекта (моторная копия), у реальных животных с распределённой нейронной сетью может оказаться необязательным при том условии, что сенсорная и моторная части их нейросетей объединены или содержат общие элементы. В таком случае информация о текущем состоянии локомоторной программы может присутствовать в сети в объёме, достаточном для эффективного функционирования основного сенсорного канала.

Нейросеть, "обученная" выделять внешние сигналы на фоне аутошумов в определённом диапазоне изменений ритма локомоции, за пределами этого диапазона также сохраняла способность к обнаружению внешних сигналов. Таким образом, даже простейшая нейронная структура, получающая информацию о собственном движении

объекта (по входу y_{in}) оказалась способной к экстраполяции.

Важным фактором, существенно влиявшим на способность сети к обнаружению сигналов на фоне аутошумов, была предсказуемость сенсорного потока во времени. В нашей модели как, по-видимому, и у живых объектов информация о предполагаемом изменении внешнего сигнала реконструировалась на основе знания его первой и второй производных. Этим можно объяснить высокую эффективность обнаружения слабых сигналов сетью с малым числом активных элементов (порядка одного - двух десятков).

Следует учитывать, что биологические нейросети характеризуются более широким набором варьируемых параметров и, следовательно, потенциально большей функциональной пластичностью по сравнению с их математическими аналогами. Исходя из этого, можно ожидать, что нейронная структура животного, состоящая из такого же количества активных элементов, способна обеспечивать ещё более эффективное, по сравнению с нашей моделью, обнаружение внешних сигналов на фоне аутошумов.

Как правило, биологические рецепторы имеют малый динамический диапазон. При большом соотношении уровней аутошума и сигнала для сохранения чувствительности рецепторных элементов необходима компенсаторная стабилизация их рабочего диапазона. Такой тип стабилизации требует он нейросети, синтезирующей сигнал эффективной компенсации, точности, обратно пропорциональной отношению сигнала к аутошуму. Например, если аутошум по амплитуде в 100 раз больше ожидаемого сигнала, то точность компенсации должна составлять доли процента. Возникает сложная проблема обеспечения такой точности, причём, как в рецепторном канале, так и при формировании компенсаторного сигнала, несущего информацию о локомоторных актах, совершаемых животным (моторной копии). Задача усложняется ещё и тем, что аутошум всегда запаздывает по фазе относительно моторной программы и в норме содержит стохастическую составляющую.

У животных с развитой нейронной системой проблема выделения внешних сигналов на фоне помех, вызванных собственным движением, по-видимому, последовательно решается в несколько этапов. После частичной компенсации аутошума на входе сенсорного канала нейрональ-

ное отображение воспринимаемого сигнала в сумме с некомпенсированной частью аутошума проходит дополнительную обработку в центральных отделах нервной системы, причём на каждом последующем этапе обработки информации используются данные о собственном движении животного (Poulet, Hedwig, 2007). Сенсорный канал, построенный по описанному принципу, в ходе эволюционного усложнения мог быть сформирован послойным наращиванием базовых нейросетевых структур, функционально аналогичных модели, рассмотренной в данной работе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №06-04-48147).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лапшин Д.Н.* Эхолокационная система бабочек. М.: Наука, 2005. 206 с.
- Лапшин Д.Н., Жантиев Р.Д.* Влияние акустических стимулов на ритм работы крылового аппарата сверчка *Gryllus bimaculatus* Deg. // Вестн. Моск. ун-та. 1992. Т. 16. №3. С. 54-61.
- Гордиенко Е.К., Лукьяница А.А.* Искусственные нейронные сети. I. Основные определения и модели // Изв. Академии наук, сер. Техническая кибернетика. 1994. № 5. С. 79-92.
- Хайкин С.* Нейронные сети. М.:Изд-во Дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
- Li W-C, Soffe S.R., Roberts A.* Spinal inhibitory neurons that modulate cutaneous sensory pathways during locomotion in a simple vertebrate // J. Neurosci. 2002. V. 22. P. 10924-10934.
- Li W-C, Higashijima S., Parry D.M., Roberts A., Soffe S.R.* Primitive roles for inhibitory interneurons in developing frog spinal cord // J. Neurosci. 2004. V. 24. P. 5840-5848.
- Poulet J.F.A., Hedwig B.* A corollary discharge maintains auditory sensitivity during sound production // Nature. 2002. V. 418. P. 872-876.
- Poulet J.F.A., Hedwig B.* The cellular basis of a corollary discharge // Science. 2006. V. 27. №311 (5760). P. 518-522.
- Poulet J.F.A., Hedwig B.* New insights into corollary discharges mediated by identified neural Pathways // Trends in Neuroscience. 2007. V. 30. № 1. P. 14-21.
- Shimozawa T., Kanou M.* Varieties of filiform hairs: Range fractionation by sensory afferents and cereal interneurons of a cricket // J. Comp. Physiol. 1984. V. 155. №4. P. 485-493.

Neural network model of signal extraction from a complex sensory flow containing self-generated noise

D. N. Lapshin, A. A. Lukyanitsa

*Institute for Information Transmission Problems of
the RAS (Kharkevich Institute)
Bolshoy Karetny per. 19,
127994, Moscow, GSP-4*

All animals inevitably have to solve the problem of extracting biologically important information which comes to their sensory organs intermixed with self-generated signals corresponding to an animal's own behavior such as locomotion. This problem arose and, probably, has been successfully solved at the early evolutionary stages.

The aim of this study was to find the minimal level of complexity of artificial neural network still able to effectively extract the 'external signal' from the background of 'self-generated noise'. We have demonstrated that provided with the information about the movements of an 'animal' ('motor copy' or 'corollary discharge') as well as with the first and second derivatives of the input signal the network consisting of 10-20 units, preliminary trained, is able to extract external signals from the background of high-amplitude 'self-generated noise'.

Key words: perception, locomotion, neural networks, models, motor copy, corollary discharge.