

УДК: 612.882.517.9

Пульсирующие коды событийных последовательностей

Цукерман В.Д.* , Кулаков С.В., Каримова О.В.

НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Ростовского госуниверситета

Аннотация. На основе результатов вычислительных модельных исследований впервые высказана гипотеза о том, что фазовые коды событийных последовательностей в мозге являются пульсирующими кодами, т.е. кодами переменной длины во временном измерении. Сделан вывод о том, что фундаментальным отличием кодирования одиночного события от кодирования динамической последовательности является сильная нелинейная зависимость длины фазового кода от межсобытийного времени. Получены доказательства сильного временного сжатия кодированных сообщений. Показаны условия возникновения феномена маскирования последнего события в последовательности. Рассматриваются примеры кодирования динамических событийных последовательностей.

Ключевые слова: *мозг, сжатый код, пульсации, последовательности, маскирование.*

1. Введение

Какой способ кодирования информации о событиях внешнего окружения использует мозг? В многочисленных исследованиях последних лет уже давалась развернутая характеристика нейронных кодов. Подчеркивается, что это одновременно коды временные и коды пространственные (популяционные), коды синхронные и коды разреженные, коды многозначные (контекстно-зависимые) и коды упорядоченные. Однако неясно, каким способом кодирования обеспечиваются эти характеристики. В опубликованных нами работах [1 – 3] высказано базовое предположение о том, что в основе таких характеристик лежит **фазовый способ кодирования сигналов в осцилляторных сетях мозга**. В качестве модели нейронной организации, реализующей этот способ, был предложен специальный класс свободно масштабируемых нейронных сетей с четным циклическим торможением.

Здесь мы впервые определяем фазовые (временные) коды динамических последовательностей событий как **пульсирующие коды**, т.е. коды переменной длины во временном измерении. При этом будут приведены конкретные примеры кодирования динамических событийных последовательностей. Фундаментальным отличием кодирования одиночного сенсорного события [3] от кодирования динамической последовательности событий является сильная нелинейная зависимость длины фазового кода от межсобытийного времени в последовательности, в результате чего длина кодированного сообщения может существенно изменяться как в одну, так и в другую сторону.

Один из главных вопросов, возникающих в этой связи, заключается в том, что кодируется в таких сообщениях. Общим признаком таких звуковых кластеров, как слова, коммуникационные звуки животных, музыкальные хорды и другие частотно-временные агрегации звуков, очевидно, является наличие у них амплитудной огибающей – аналога видимых контуров объектов в зрительной сцене. Эта важнейшая переменная – огибающая в звуковом сигнале и контуры объектов в зрительной сцене – функционально значимы и несут основную информацию об объектах внешнего мира. Отметим, что кодированное нейронное сообщение есть **интегрированное временное представление последовательности**

* e-mail: vdts@krinc.ru

событийных паттернов, поступающих на входы сети. Здесь будет показано, что такая интеграция – это фазовый способ представления последовательности пространственных паттернов во временном окне тета-цикла. Такое окно (длина кода) имеет динамическую пульсирующую природу и может служить естественным инструментом формирования динамических объектов в мозге. Более того, это окно само по себе может «мигрировать», появляясь то раньше, то позже в тета-цикле, в зависимости от межсобытийных интервалов и соотношения средних уровней энергии паттернов.

2. Примеры кодирования последовательности двух событий

Интуитивно, кажется, что кодирование мультисобытийных паттернов должно зависеть от временных интервалов, разделяющих эти события. Поэтому дальнейшие вычислительные эксперименты будут проведены таким образом, чтобы выявить эту связь. Пусть имеется последовательность двух событий, следующих друг за другом с некоторой временной задержкой. И пусть каждое событие представлено уникальным паттерном (рис. 1).

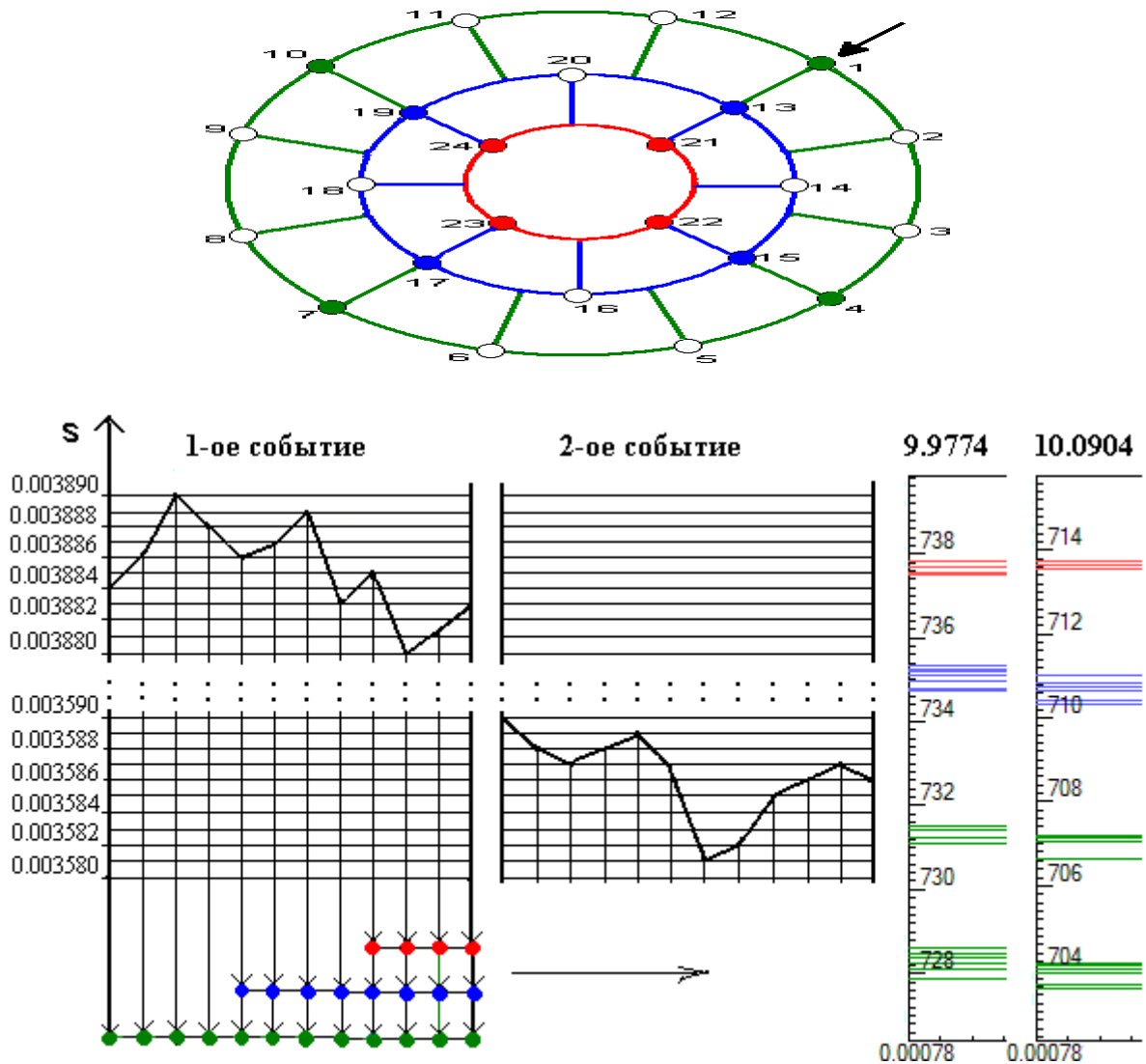


Рис. 1. Кодирование двух одиночных событий в сети размерности 7x7 (вверху). Каждое из событий представлено сложным уникальным паттерном: высокоамплитудным – слева и низкоамплитудным – справа. Каждому входу сети, показанному стрелкой, соответствует короткое импульсное воздействие (амплитуды импульсов указаны на шкале слева). Соответствующие данным паттернам *фазовые составляющие кода* показаны цветными полосами справа. По временным шкалам видно, что каждый код занимает собственное временное окно в тета-цикле. На горизонтальной числовой оси – значения неспецифического (модулирующего) входа, определяющего состояние сети (фазу тета-ритма) в момент прихода событийного паттерна. Все параметры сети соответствуют аналогичным параметрам, указанным в первой статье.

Получим вначале фазовый код сети на каждый из паттернов, представляющих то или иное событие в отдельности с тем, чтобы в дальнейшем можно было сравнивать эти ответы на последовательность тех же событий, следующих с различными межсобытийными временными интервалами. Каждый из двух представленных выше, высокоамплитудный (слева) и низкоамплитудный (справа), паттернов сигналов продолжительностью 3 у.е., имеет соответствующий фазовый код, характерной особенностью которого является упорядоченная временная активность нейронов, и их группирование с очень сходным относительным положением. Кроме того, видно, что продолжительность временного кода каждого события в нейронной сети более чем в три раза превышает исходную длительность самого события. Действительно, длина фазового кода высокоамплитудного паттерна составляет 9.9774 у.е., а низкоамплитудного – 10.0904 у.е. времени для одного и того же состояния нейронной сети.

Каждый из полученных фазовых кодов характеризуется заметной специфичностью, отличаясь, во-первых, временным порядком информационных единиц в самом коде, во-вторых, расположением временного окна кода в тета-цикле, и, в-третьих, общей продолжительностью, т.е. длиной кода данного события.

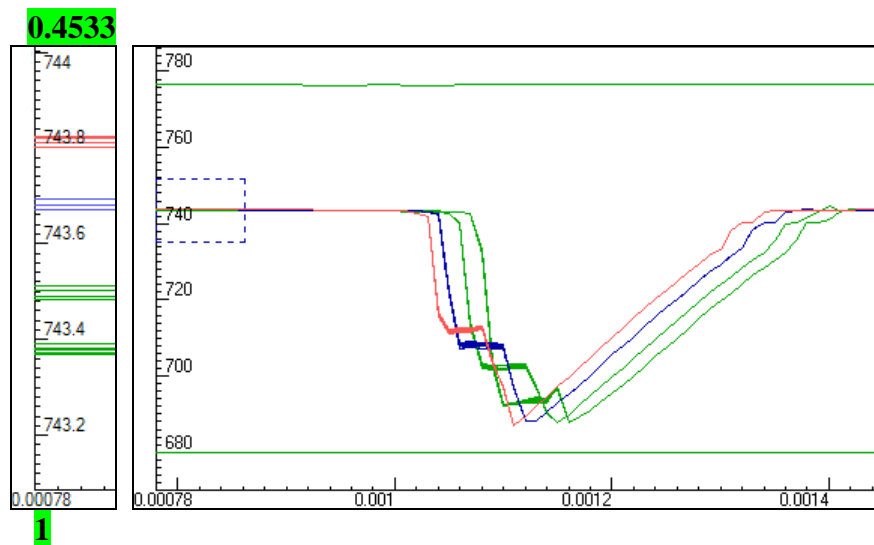


Рис. 2. Кодирование последовательности событийных паттернов, представленных на рис. 1, следующих с временным интервалом, равным 1 у.е. времени. Справа в рамке показаны контекстные фазовые кривые показаны контекстные фазовые кривые всех трех колец нейронной сети. Пунктиром в прямоугольнике выделена область постоянства фазовых отношений нейронов колец, которая будет рассматриваться здесь и далее. Слева в рамке – тонкое временное разложение фазовых кривых в выделенной пунктиром области. Цвета фазовых составляющих кода событийной последовательности по-прежнему соответствуют цветам нейронов внутреннего (красного), промежуточного (синего) и внешнего (зеленого) колец нейронной сети. Здесь и далее числа, выделенные цветом под рамкой, в которой показан фазовый код, означают величину межсобытийного интервала, а число над рамкой – длину кода. Эксперимент **2n49dexp2006-6f8-1**.

Что происходит с фазовым кодом, когда одно событие следует за другим с некоторым временным интервалом, в частности, низкоамплитудное событие следует за высокоамплитудным событием, подобно тем, которые представлены выше? Как будет показано далее, фазовый код событийной последовательности нелинейно зависит от временного интервала между событиями. В качестве примера на рис. 2 представлено кодированное сообщение нейронной сети о последовательности двух событий, следующих с единичным временным интервалом. Видно, что это сообщение характеризуется сильно сжатым временным кодом, длительность которого составляет всего 0.4533 у.е. времени при исходной длительности каждого из событий 3 единицы времени.

Второй особенностью кодирования данной последовательности является общее смещение фазового кода в тета цикле в сторону более поздних значений, т.е. увеличение латентности ответа сети (напомним, что ось времени направлена вверх). Таким образом, введение единичного интервала и последующего события, длительностью в 3 у.е. приводит к заметному смещению всего кода, что хорошо видно на фазовых диаграммах.

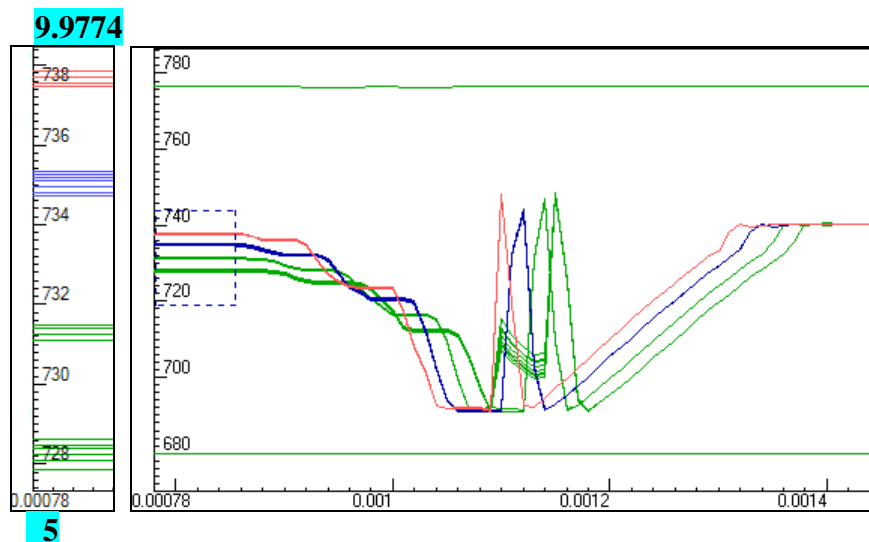


Рис. 3. Та же последовательность событийных паттернов, что и на предыдущем рисунке, но следующих с временным интервалом в 5 у.е. Парадокс заключается в том, что увеличение по сравнению с предыдущим случаем временного интервала до 5 единиц приводит к уменьшению латентности ответа сети. Полученный фазовый код событийной последовательности в точности соответствует фазовому коду первого высокоамплитудного события (сравните с рис. 1). Эксперимент **2n49dexp2006-6f8-5**.

Далее, при увеличении интервала между двумя событиями до 5 единиц времени, длительность кода той же событийной последовательности резко возрастает и составляет уже величину 9.9774 (рис. 3). Кроме того, численный анализ показывает, что фазовый код событий, следующих с временным интервалом в 5 единиц времени в точности соответствует коду первого события. Если еще учесть, что временное окно фазового кода вновь возвращается в ту же область тета-цикла, которую занимало первое событие, то очевидно, что второе событие никак не повлияло на кодирование всей последовательности. Последнее замечание позволяет сделать вывод о том, что **увеличение до определенных пределов временного интервала между двумя событиями** может привести к хорошо известному в психофизиологии сенсорного восприятия феномену маскирования. Возникает, однако, вопрос: связан ли полученный феномен маскирования с принятым в данном случае порядком следования низкоамплитудного за высокоамплитудным событием, или этот феномен связан только с временным интервалом?

Отсюда очевидна необходимость проведения систематических исследований фазового кодирования прямых и обратных последовательностей событий в широком диапазоне межсобытийных временных шкал. А здесь лишь отметим, что действительно, решающим фактором в этом феномене является время между событиями. А сам феномен может проявляться при меньших или больших временах между событиями, чем в данном примере, в зависимости от соотношения средних уровней энергии предыдущего и последующего событий в последовательности.

3. Зависимость фазового кода последовательности от межсобытийного времени

Далее мы представим серии фазовых кодов последовательностей, вначале двух, а затем трех событий, следующих с различными временными интервалами. Как было показано ранее, одной из важнейших характеристик кодов является их длина. Другой важной особенностью является **временной порядок фазовых составляющих этих кодов**. Будем различать коды «правильные», у которых временной порядок следования фазовых составляющих – от нейронов внешнего (зеленого) к внутреннему (красному) кольцу и «неправильные», имеющие обратный порядок. Примеры «правильных» кодов показаны, на рис. 1 и рис. 3. А вот код обратной последовательности событий на рис. 4 имеет неправильный порядок. Числа, соответствующие временному интервалу между событиями (внизу) и длину «аномального» кода (вверху) с неправильным порядком будем закрашивать желтым цветом.

Первое, что становится заметным при анализе кодированных сообщений, – это сильная нелинейная зависимость длины кода от межсобытийного интервала. В самом деле, проведенные серии вычислительных экспериментов свидетельствуют о существовании многочисленных областей межсобытийных временных интервалов, в пределах которых кодированные сообщения могут изменять самым разнообразным образом и свою длину, и структуру (порядок) фазовых составляющих.

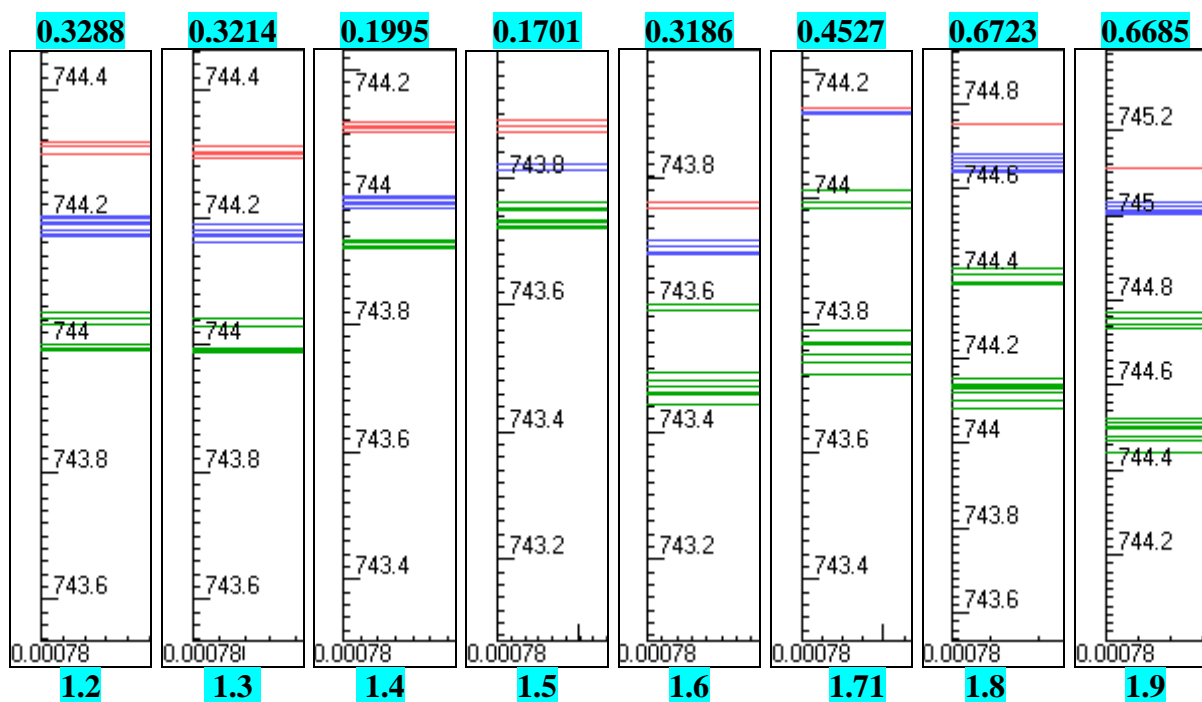
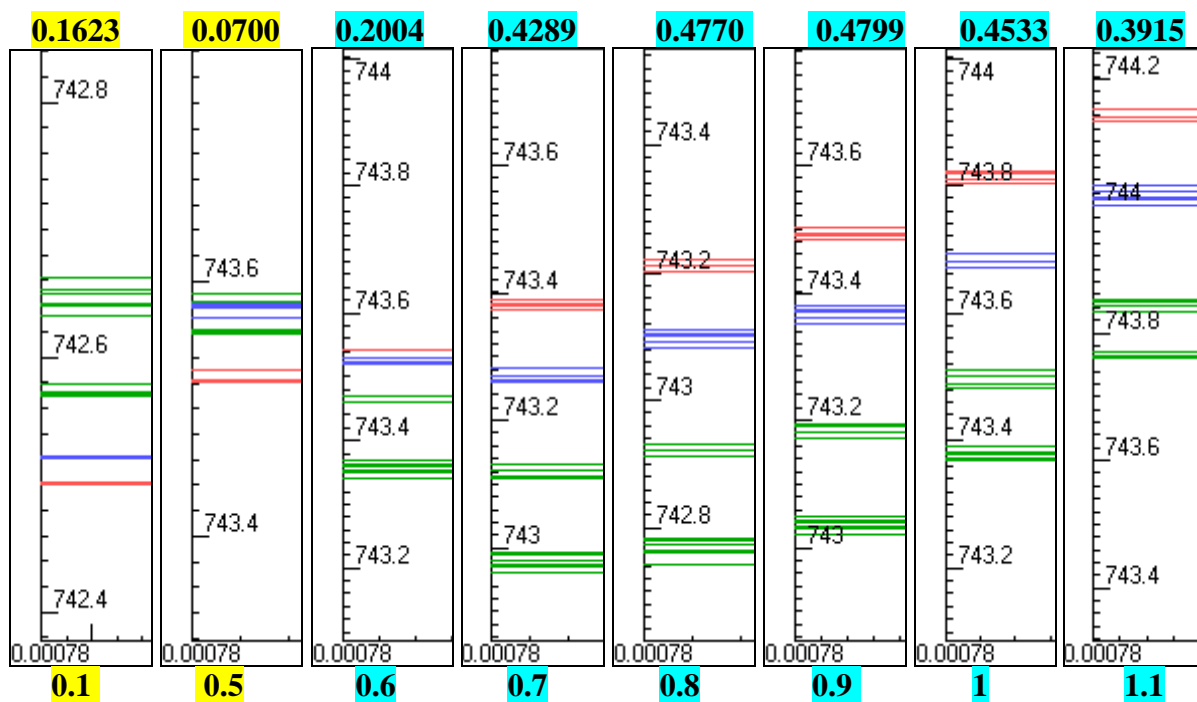
Так, в диапазоне малых значений межсобытийных временных интервалов от 0.1 до 5 длина кода данной последовательности постоянно претерпевает сжатие-растяжение. Однако, в целом длина кода данной последовательности значительно меньше суммарной длительности обоих событий и временного интервала между ними. При минимальных значениях межсобытийного интервала (от 0 до 0.5 у.е.) получен код с неправильным порядком (помечено желтым цветом). Подобные аномальные коды можно наблюдать и при больших значениях межсобытийных интервалов.

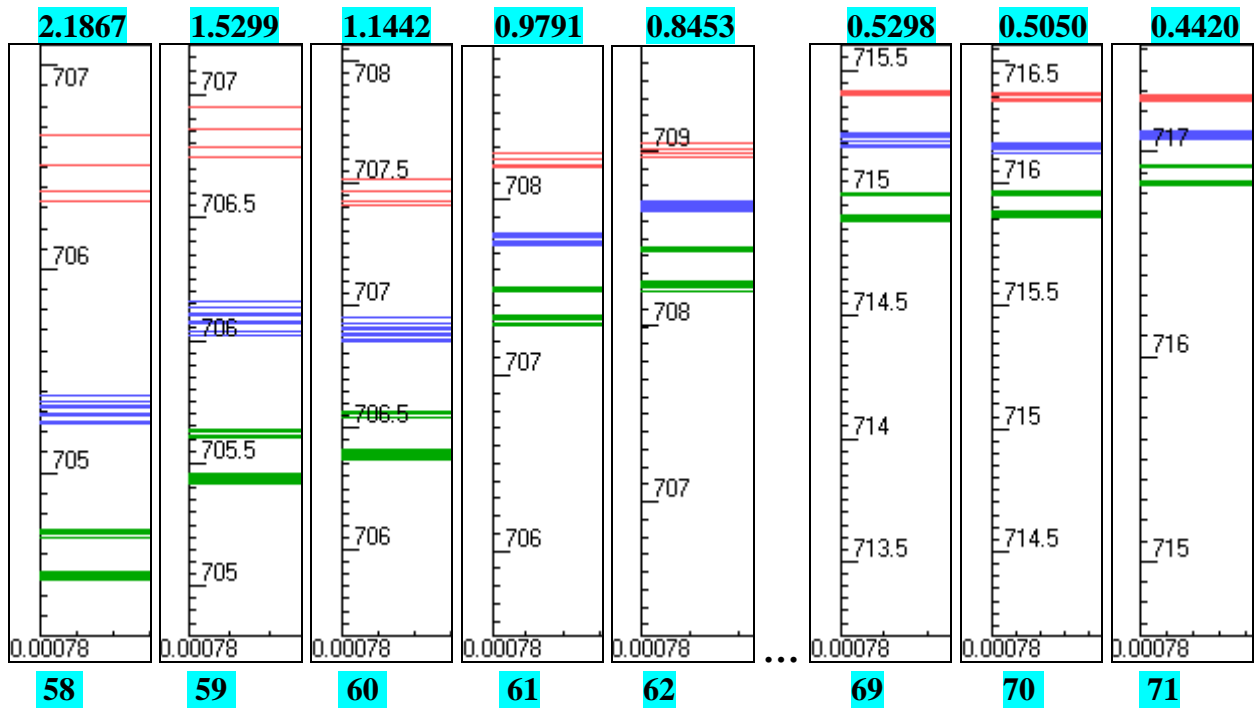
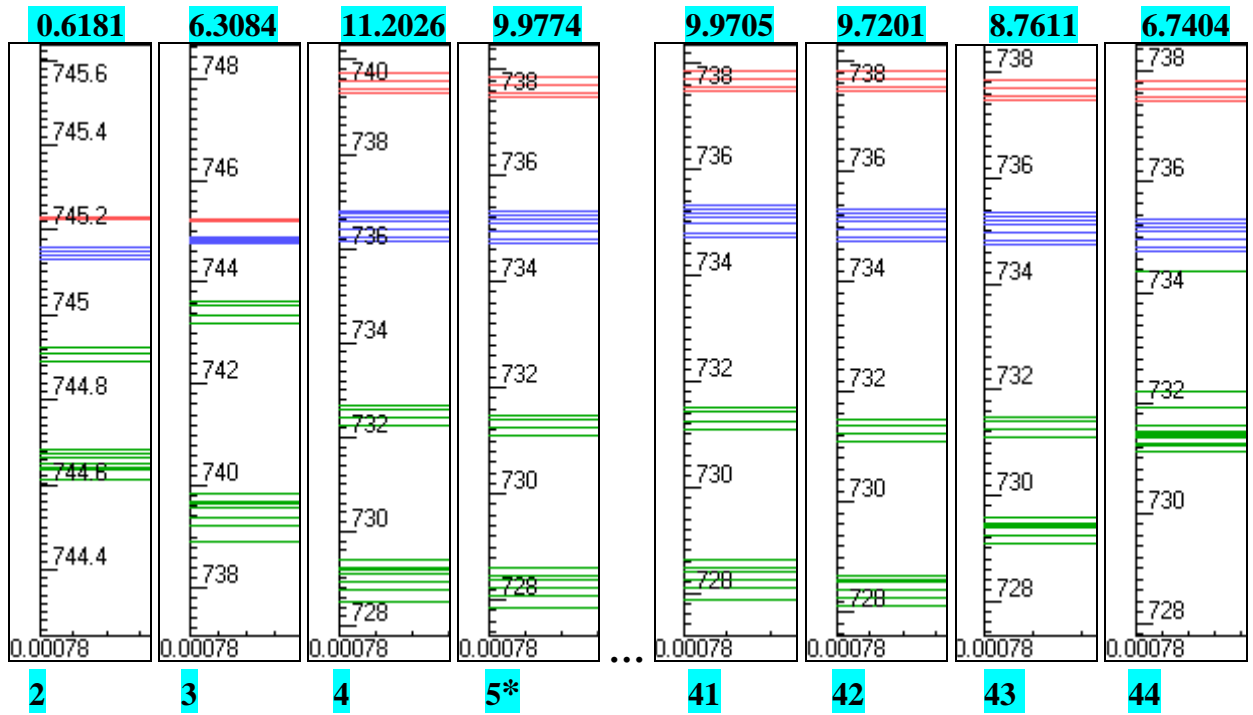
Увеличение времени между событиями от 2 до 5 единиц приводит к резкому возрастанию длины фазового кода данной последовательности и ее фиксации (насыщению) при значении 9.9774. Достигнув своего предельного значения при временном интервале между событиями, равном 5 единицам, длина фазового кода сохраняется неизменной при дальнейшем возрастании времени между событиями вплоть до ~ 42 у.е. времени. Легко заметить, что величина 9.9774 соответствует длине кода первого события, и, как уже отмечалось ранее, при этом временном интервале достигается полное маскирование второго события последовательности.

Интересно, что при дальнейшем возрастании межсобытийных интервалов длина кода снова может подвергнуться сильному сжатию, достигнув, например, при временном интервале в 71 единицу очень малой величины **0.4420**. При этом временное окно кодированного сообщения располагается *значительно раньше (вначале) в тета-цикле, чем при коротких межсобытийных интервалах*. Таким образом, формирование сжатых фазовых представлений в сети возможно не только для близких по времени событий, но и для отдаленных событий с большими межсобытийными интервалами.

Анализ приведенных ниже фазовых кодов, полученных при различных межсобытийных интервалах, показывает следующие особенности кодирования коротких последовательностей: 1) длина кодированного нейронного сообщения об одних и тех же событиях не имеет фиксированной длины, а существенно зависит от временного интервала между событиями; 2) кодированные нейронные сообщения могут иметь большую длительность при малых интервалах между событиями и, наоборот, короткую продолжительность при больших межсобытийных интервалах; 3) в пределах медленноволнового тета-цикла существуют две временные зоны, в которых происходит полное маскирование второго события (эти интервалы помечены звездочками); основные характеристики фазового кода включают его длину и временной порядок фазовых составляющих этих кодов.

Следует также обратить внимание на одно важное обстоятельство, упомянутое выше. Приведенные далее на рис.4 фазовые коды относятся к последовательностям, у которых первое событие имеет более высокий уровень энергии, чем второе. Именно поэтому при малых межсобытийных временных интервалах (до 0.5 условных единиц времени) получены «неправильные» коды, помеченные на этом рисунке желтым цветом. Обратный порядок следования событий, когда высокоамплитудному событию предшествует низкоамплитудное, уже при малых межсобытийных интервалах дает правильные коды, что нами было показано экспериментально. В этой связи заметим, что для реальных звуковых последовательностей событий, свойственных тембру звучания того или иного музыкального инструмента, характерным для атаки звука является именно такое соотношение энергий.





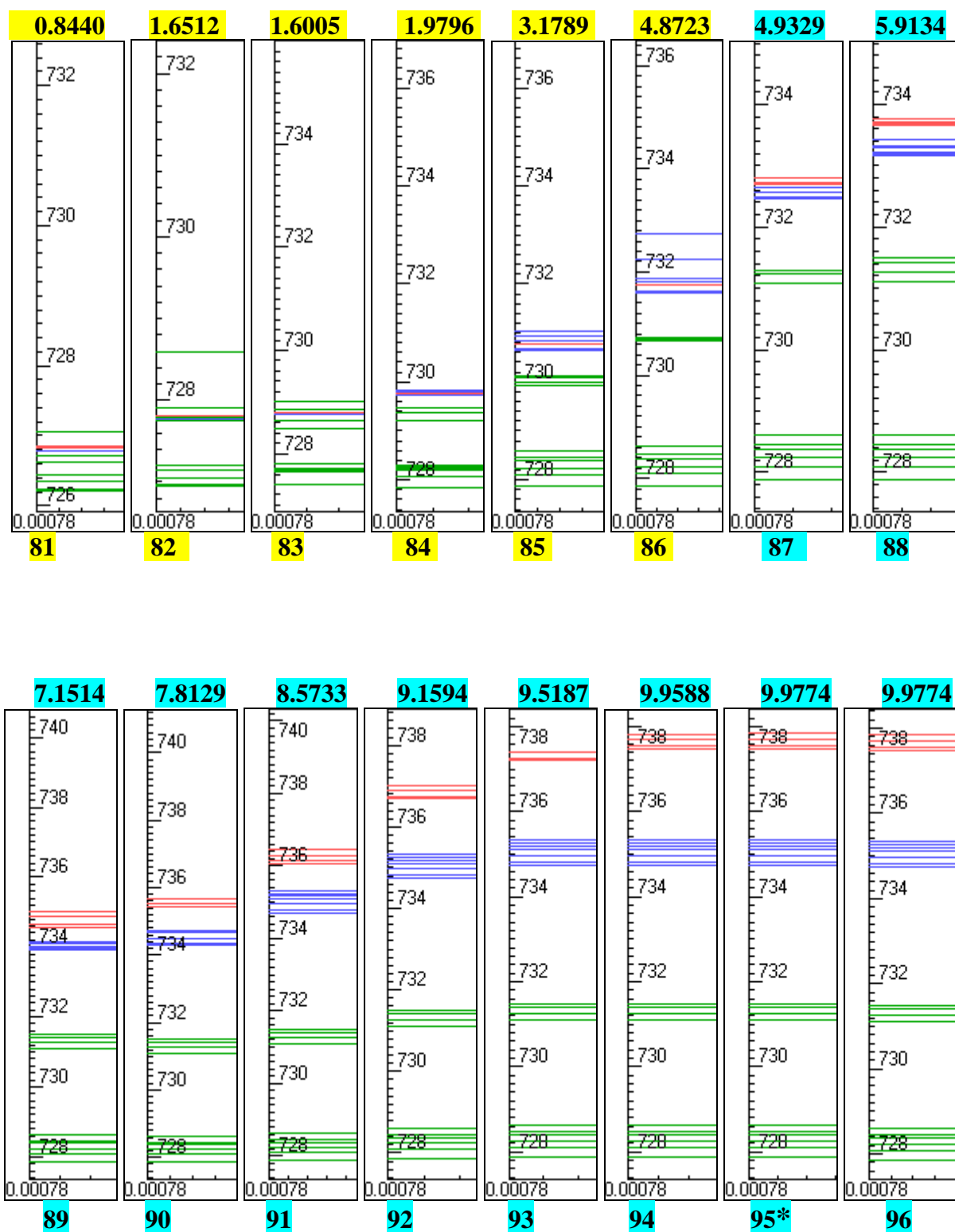


Рис. 4. Динамические перестройки фазовых кодов последовательности двух событий в зависимости от межсобытийного интервала, показанные последовательно на стр.113–115. Звездочкой помечены значения интервалов между событиями, при которых наблюдается феномен полного маскирования последнего события.

3.1. Кодирование последовательности трех событий

Рассмотрим теперь кодирование трех событий С, В и А, взяв за основу первые два и добавив к ним еще одно низкоамплитудное событие А.

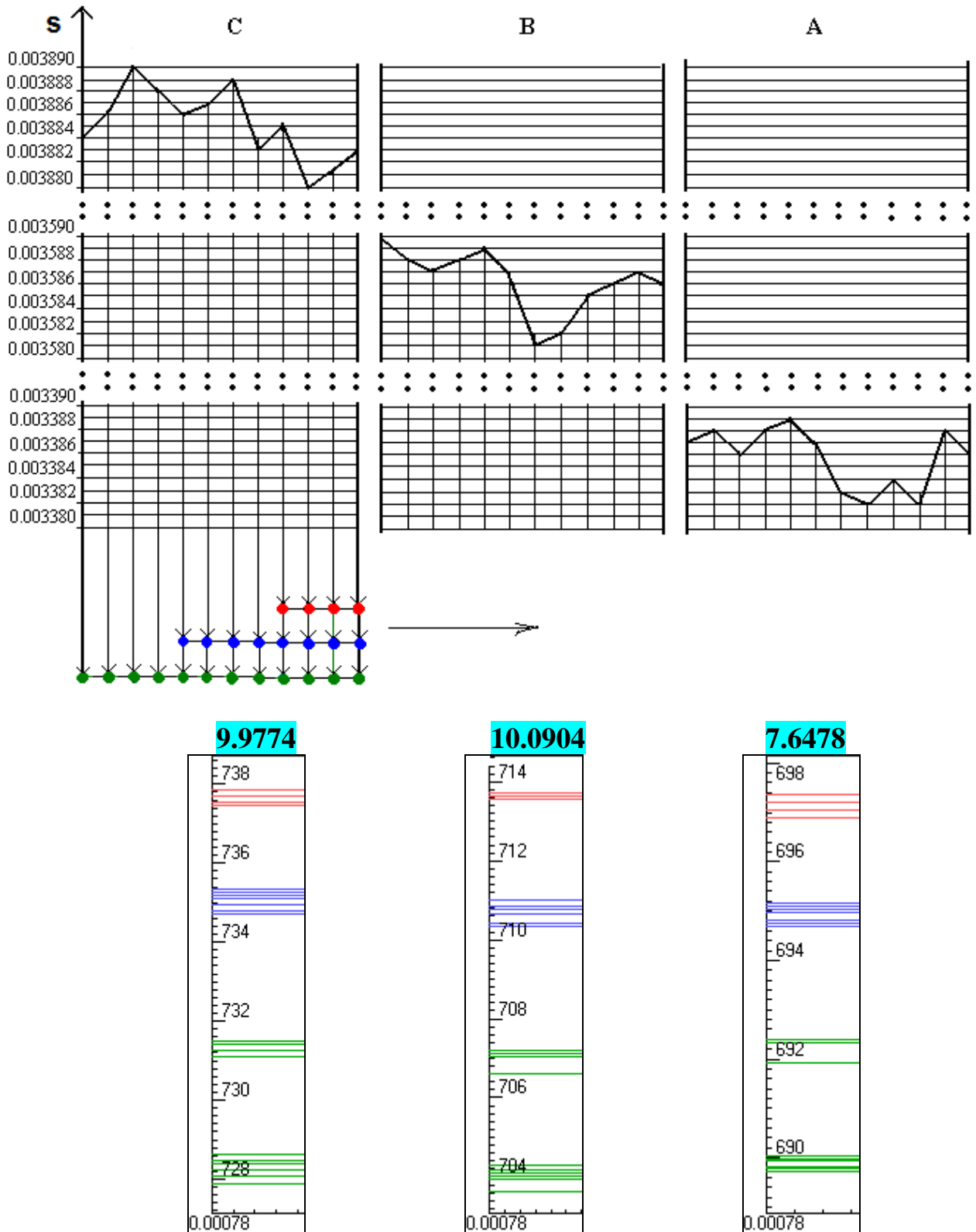
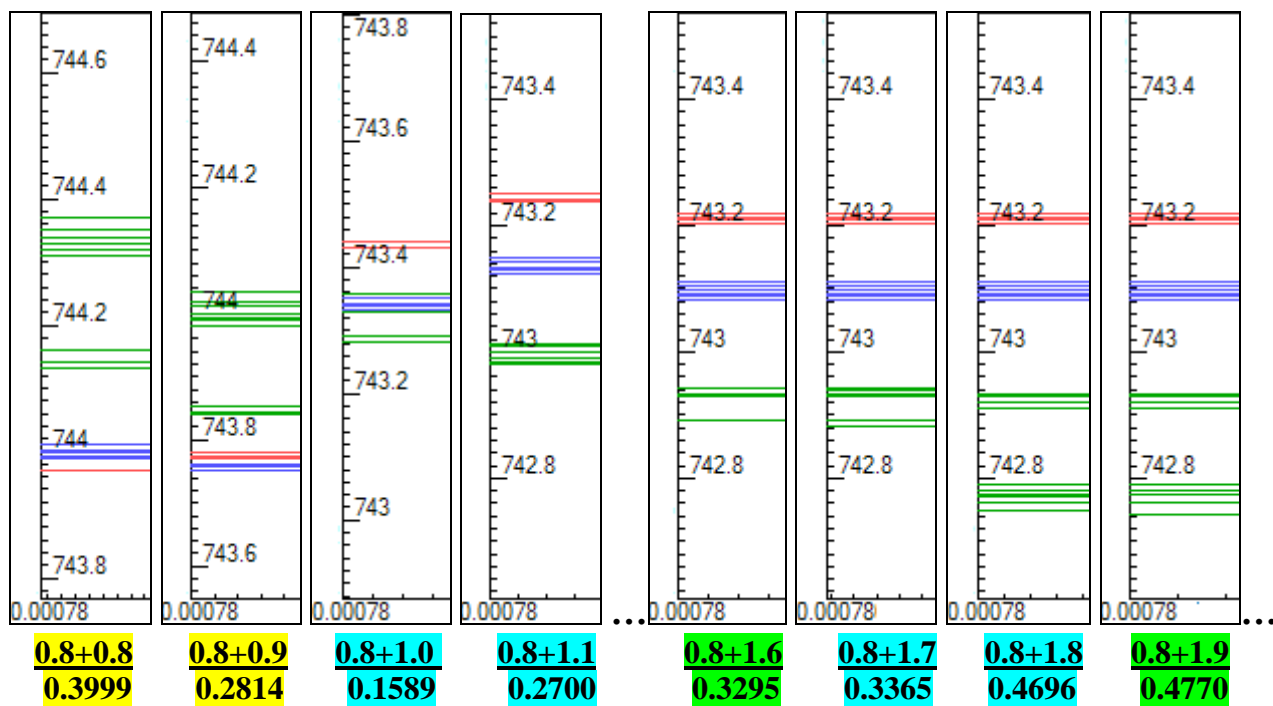
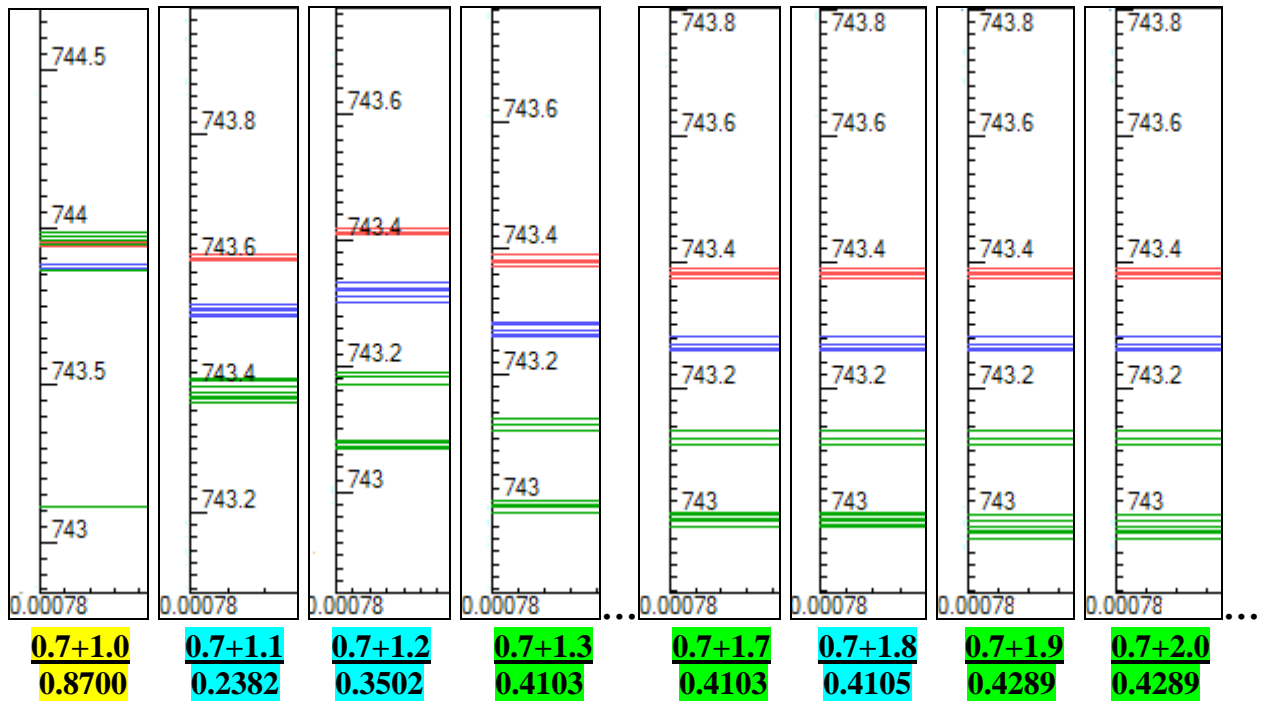


Рис. 5. Кодирование одиночных событий С, В и А, представленных сложными паттернами сигналов, различных энергетических уровней. Внизу под каждым паттерном – соответствующие им фазовые коды и численные значения длины кода.

Далее на рис. 6 (страницы 117 и 118) представлены результаты 4-ех серий вычислительных экспериментов с кодированием последовательностей трех событий СВА с различными наборами межсобытийных интервалов.

ПУЛЬСИРУЮЩИЕ КОДЫ СОБЫТИЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ



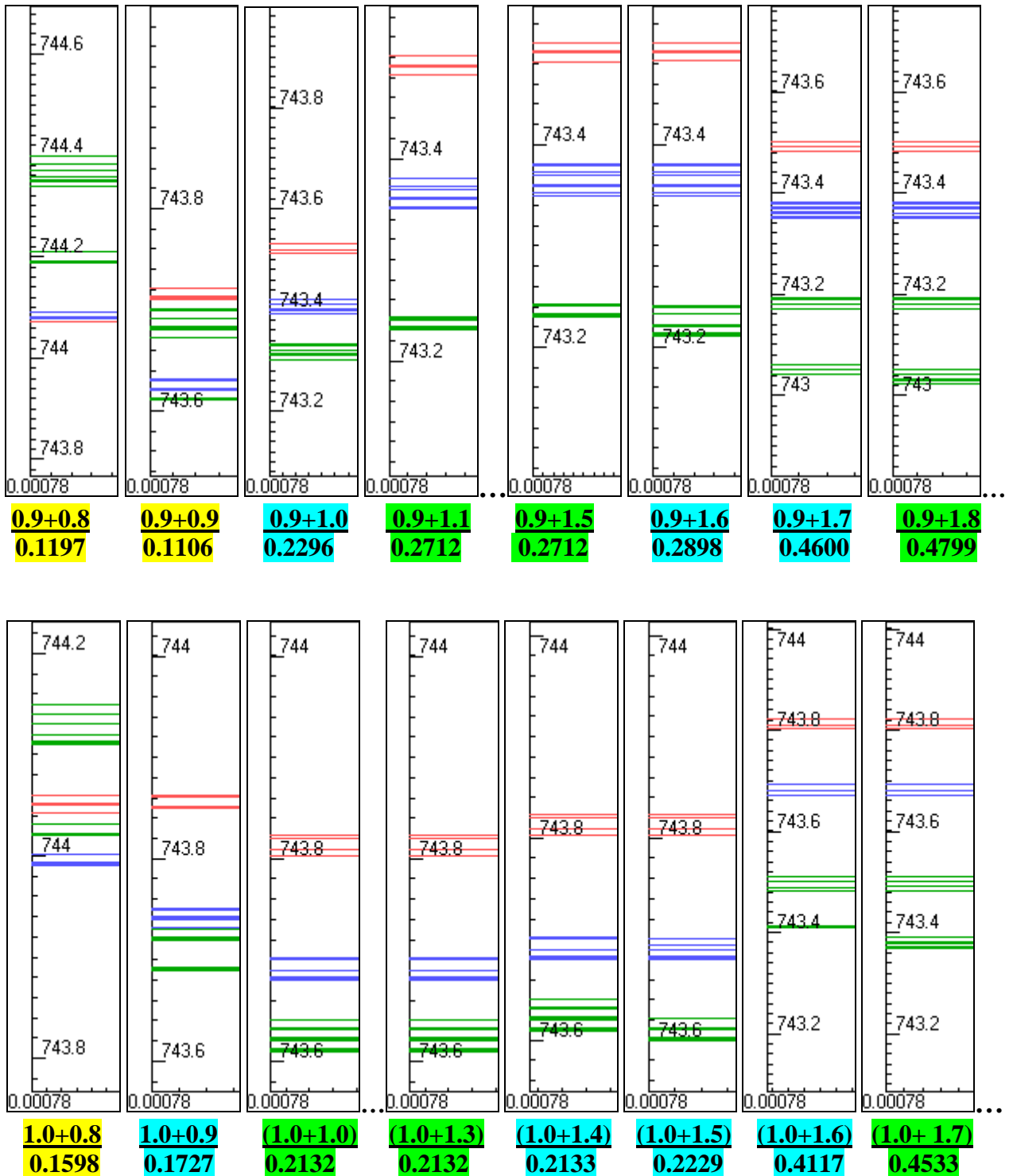


Рис. 6. Кодирование длинных последовательностей событий СВА с различными наборами межсобытийных интервалов (страницы 117 и 118). Значения первого и второго интервалов показаны в числителе дроби в виде суммы двух чисел. В знаменателе – длина кода последовательности с соответствующими временными интервалами.

В каждой из представленных выше 4-ёх серий экспериментов, в числителе, значение первого интервала постоянно (для данного ряда) и выбрано из следующих соображений. Первые два события С и В в последовательностях с временными интервалами **0.7, 0.8, 0.9, и 1.0** имеют соответствующие правильные коды с длиной **0.4289, 0.4770, 0.4799, 0.4533** (см. рис. 4, верхний ряд). Второй интервал последовательности СВА в каждой серии варьировался. Если в результате код последовательности СВА получался неправильным, то численное значение его длины закрашивалось желтым цветом. Если код последовательности

был правильным, то – голубым цветом. А если код был правильным, но неизменным (фиксированным) в той или иной временной зоне значений второго интервала, то значение длины кода закрашивалось зеленым цветом. Такая маркировка позволяет сделать более наглядными существование различных временных зон, с которыми связаны те или иные феномены.

Анализ показывает, что в каждом ряду появились коды всех трех категорий. Так, если последовательность СВ ранее имела правильный код, то последовательность СВА при малых значениях второго интервала может быть «испорчена», т.е. имеет неправильный код. Это относится ко всем четырём сериям экспериментов. Далее, в каждой серии получены активные «голубые зоны», с непрерывно меняющимися кодами, и «зеленые зоны», в которых длина кода постоянна. Особого внимания среди них заслуживают последние зоны, где длина кода получает предельное значение, т.е. насыщение. В данной серии экспериментов эти значения представляют собой следующий ряд: **0.4289, 0.4770, 0.4799, 0.4533**. То есть опять получен ряд значений, соответствующих кодам двухсобытийной последовательности. Последнее означает, что снова мы имеем дело с маскированием последнего события в последовательности.

Какие выводы можно сделать из этих серий экспериментов: 1) возможность получения правильного кода длинной последовательности СВА сужается по сравнению с короткой последовательностью СВ; 2) пульсации кода длинной последовательности наблюдаются лишь при малых межсобытийных интервалах; 3) маскирование последнего события в последовательности является устойчивым феноменом, зависящим от временного интервала перед этим событием; 4) увеличение числа событий в последовательности приводит к сильному сжатию временной шкалы, в которой происходит кодирование.

4. Обсуждение результатов

Целью высокоуровневого кодирования в нервной системе является формирование интегрированных кодов целостных объектных представлений из многочисленных паттернов сигналов, поступающих на ее входы, и их запоминание. Но, как показывает наш жизненный опыт, далеко не всякая последовательность может хорошо восприниматься и запоминаться. Приведенные выше вычислительные эксперименты подтверждают это. Оказывается, для правильного кодирования последовательности нейронной сети необходима своеобразная гармония событий. Они должны появляться в определенных временных зонах для того, чтобы получить правильные фазовые представления в активности нейронной сети. Причем, чем больше событий в последовательности, тем более жесткие требования к межсобытийным интервалам для формирования объектного представления. Образно говоря, некоторые последовательности могут «резать слух» и формировать «плохие» представления.

Грамо с сотр. (2001), изучая этномузыкофизиологию, психологию развития и поведение животных, пришли к выводу о том, что базовые принципы теории гармонии в музыке отражают физиологические и анатомические свойства слуховой нервной системы и связанные когнитивные системы. Используя физиологические, психоакустические и нейробиологические методы, им удалось показать, что свойства слуховой системы, которые связаны с восприятием гармонии, заключают в себе: 1) способность периферических слуховых нейронов кодировать временные регулярности в тонкой акустической структуре и 2) дифференциальную настройку многих нейронов во всей слуховой системе в узкую область частот в слышимом спектре. Биологически обусловленные пределы этих свойств накладывают свои ограничения и связи в области музыкальных нот, используемых повсеместно в мире, и ноты комбинируются вместе только с учетом временных интервалов для того, чтобы образовать согласованные музыкальные хорды или отрезки. Кроме того, имеет значение гармоническая связанность высоты тонов нот, как основной энергетической составляющей в музыке. В противном случае, для несогласованных нот парциалы, интерферируя друг с другом, вызывают грубые флуктуации в активности периферических и центральных слуховых нейронов и производят ощущение резкости и диссонанса [4].

Интересным результатом, полученным в вычислительных экспериментах, является тот факт, что каждое последующее событие в последовательности может войти в сжатый код нейронного сообщения только до определенных пределов (значений) межсобытийных интервалов. Превышение этого интервала приводит к фазовому коду более короткой (предыдущей) последовательности, означая тем самым, что последнее событие маскировано. Этот теоретический результат в принципиальном плане может означать существование **критического времени интеграции событий последовательности**. Наиболее вероятно, что сенсорная интеграция и формирование динамических объектов должны ограничиваться величиной межсобытийного интервала и относительным уровнем энергий предыдущего и последующего событий и, конечно, текущим состоянием сети, вследствие чего, «склеивание» целостных объектов или динамических эпизодов – далеко не простой линейный процесс.

Увеличение числа событий в последовательности приводит к сильному сжатию временной шкалы, в которой происходит кодирование. Почему важно столь сильное сжатие кодированных сообщений ясно из того факта, что биофизические механизмы синаптической пластичности работают в очень узких временных шкалах, по некоторым данным порядка ~10 мсек [5–7]. Таким образом, нейронная сеть может производить временной «естественный отбор» тех кодов, которые подлежат дальнейшему запоминанию. Но тогда возникает вопрос: каков численный ресурс кодирования, т.е. какое количество событий может быть правильно закодировано в сети? Наши экспериментальные исследования показали достаточно прогнозируемый результат: это зависит от ряда факторов, в том числе от адаптационных параметров сети, длительности событийных паттернов (здесь они принимались равными 3 у.е. времени), а также относительных энергетических уровней паттернов входных сигналов. В данной работе параметры сети и входные переменные были выбраны из соображений удобства графических представлений и их наглядности при демонстрации принципиальных особенностей событийного кодирования в рассматриваемой нейронной сети. Этими же причинами объясняется и выбор небольшой размерности нейронной сети, на которой проведены данные серии экспериментов (в данной статье 7x7).

В настоящей работе было показано, что фазовый код имеет три основные характеристики: а) длину кода, б) положение фазовых составляющих в коде и в) временное окно в низкочастотном (тета- или альфа-ритме). Кроме того, в предыдущей статье было подчеркнуто, что постоянство относительного положения фазовых составляющих в коде события может быть обеспечено различными информационными единицами. В специально проведенных экспериментах нами показано, что по признаку длины фазовый код последовательности является вырожденным. Это означает, что одну и ту же длину могут иметь последовательности событий с различными межсобытийными временными интервалами.

Длина кодированного сообщения изменяется нелинейным образом в зависимости от межсобытийного интервала, предельное значение которого приводит к феномену маскирования. Как было показано на примере длинной последовательности трех событий, величина временного интервала, при котором достигается маскирование, может служить естественным стоп-сигналом нейронного сообщения, т.е. терминатором фазового кода последовательности.

Ключевой идеей в формулировке Лэшли проблемы последовательного порядка в поведении является нейронное представление всех последовательных элементов перед началами действий. Как установил Лэшли 50 лет тому назад [8], последовательный порядок является фундаментальным для всех форм обученных действий – от речи до печатания на клавиатуре. Речь является хорошим примером элементов, организованных последовательно на различных уровнях: фонемы произносятся последовательно, чтобы составить слоги, слоги складываются последовательно, чтобы составить слово, слова произносятся последовательно в предложении. Общим элементом во всех примерах последовательных действий является **последовательно упорядоченное следование низкорядковых единиц действия** (т.е.

фонем, простых движений) *внутри более высокопорядковых единиц* (слов, интегрированных моторных действий, таких, например, как рисование фигуры).

Главной теоретической установкой Лэшли был отказ от теорий ассоциативных цепочек и предложение новой альтернативной модели, основанной на параллельной активации ответа. Лэшли постулировал *одновременную активацию последовательно упорядоченных единиц действия*: «Существуют указания, что перед внутренним или явным произношением предложения, набор словесных единиц частично активируется или готовится к считыванию». Он также постулировал сканирующий механизм, с помощью которого эти одновременные представления могут быть транслированы в последовательные действия: «указания... что элементы [последовательности] являются частично активированными перед установленным в них порядком в выражении предполагает, что некоторый *сканирующий механизм* должен проявляться в регуляции их временной последовательности. Реальной проблемой, однако, является природа селективного механизма, с помощью которого частные действия «вовлекаются» в этот сканирующий процесс и на эту проблему я не имею ответа» [8].

Хотя теоретические модели «CQ-модели», так называемой конкурирующей очередности [9,10], уже были известны, вплоть до последнего времени не было прямых электрофизиологических доказательств, что мозг использует параллельный код последовательности. Averbek с сотр. (2002) исследовали эту проблему с помощью одновременной регистрации активности в малых ансамблях нейронов префронтальной коры обезьян, в то время как животные копировали геометрические формы, показанные на экране. Они тренировали обезьян рисовать копию статических геометрических фигур с использованием одной и той же последовательности сегментов движений, и эти сегменты были ассоциированы с различными паттернами активности нейронных ансамблей. Авторам удалось показать, что эти паттерны были представлены в течение времени, предшествующего действительному рисованию [11].

Наша модель основана на параллельном съеме паттернов сигналов на входах сети и их временном разложении в координированный упорядоченный код. Таким образом, проблема сенсомоторной координации может решаться, используя одни и те же правила кодирования событий. Относительно упомянутого Лэшли «сканирующего механизма» заметим здесь, что речь идет о считывании временного событийного кода с помощью некоего «селективного механизма». Результаты наших работ, связанных со считыванием кодированных сообщений, готовятся к публикации.

Далее приведем одно из последних исследований нейронных кодов, представляющее интерес в контексте наших результатов. Hung с сотр. (2005) использовали биологически обоснованную методику считывания, основанную на специальном классификаторе, для исследования нейронного кодирования селективности и инвариантности зрительных объектов на IT популяционном уровне в инферотемпоральной коре макака. Оказалось, что активность малых нейронных популяций (примерно 100 случайно выбранных клеток) в течение очень коротких временных интервалов (около 12.5 мсек) и 125-мсек латентностью заключала в себе неожиданно точную и устойчивую информацию и об «идентичности», и о «категории» объектов, которым ранее обучали обезьян. Эта информация обобщалась на широкую область положений объектов и их масштабов [12]. Эти результаты созвучны нашему выводу о том, что целостные объектные представления в мозге могут кодироваться в сильно сжатой временной форме.

И, наконец, еще один заслуживающий внимания результат. Формирование интегрированных кодов целостных объектных представлений в сжатой форме возможно не только для близких, но и отдаленных событий с большими временными интервалами. Здесь это было показано на примере коротких последовательностей. Это имеет отношение к иерархическому построению сложных объектов из последовательно упорядоченных во времени низкопорядковых единиц. Необходимо отметить, что интегрированный код нейронного сообщения теряет уникальность фазовых кодов отдельных событий в

последовательности, но именно благодаря этому наш мозг обладает способностью к симультанному восприятию.

Наши дальнейшие исследования направлены на решение задач, связанных с проблемой кодирования, сжатия и декодирования реальных последовательностей звуковых событий на примере музыкальных и речевых фрагментов различной длительности. Исследования в области музыкальных и речевых способностей восприятия в последние годы получили широкое развитие [4,13–15]. Одна из наиболее интересных проблем здесь связана с синтаксисом. Синтаксис может быть определен как набор принципов, управляющих комбинацией структурных дискретных элементов (таких как слова или музыкальные тоны) в последовательности. Комбинаторные принципы действуют на многочисленных уровнях, таких как формирование слов, фраз и предложений в языке, и хорд, хордовых прогрессий и ключей в музыке [15]. Как собираются базовые элементы в последовательности – одна из основных наших задач будущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цукерман В.Д., Кулаков С.В. 2004. Биологические алгоритмы кодирования сенсорных событий. *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. М.: Изд-во Радиотехника. **11**. с.15–25.
2. Цукерман В.Д. 2005. *Нелинейная динамика сенсорного восприятия, или Что и как кодирует мозг*. Ростов-на-Дону. Изд-во Ростовского Университета. 195 с.
3. Цукерман В.Д. 2006. Математическая модель фазового кодирования событий в мозге. *Математическая биология и биоинформатика*. **1** (в этом томе). [http://www.matbio.org/downloads/Tsukerman2006\(1_97\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Tsukerman2006(1_97).pdf).
4. Tramo M.J., Cariani P.A., Delgutte B., Braida L.D. 2001. Neurobiological foundations for the theory of harmony in western tonal music. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **930**. 92–116.
5. Markram H. et al. 1997. Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*. **275**. 213–215.
6. Zhang L.I. et al. 1998. A critical window for cooperation and competition among developing retinotectal synapses. *Nature*. **395**. 37–44.
7. Bi G., Poo M. 2001. Synaptic modification by correlated activity: Hebb's postulate revisited. *Annu. Rev. Neurosci.* **24**. 139–166.
8. Lashley K.S. 1951. The problem of serial order in behavior. In: *Cerebral Mechanisms In Behavior*. Ed. Jeffress L.A. New York. Wiley. pp.112–136.
9. Grossberg S. 1978. A theory of human memory: self-organization and performance of sensory-motor codes, maps, and plans. In: *Progress in Theoretical Biology*. Eds. Rosen R., Snell F. Academic Press. **5**. pp. 233–374.
10. Houghton G. 1990. The problem of serial order: A neural network model of sequence learning and recall. In: *Current Research In Natural Language Generation*. Ed. Dale R. Academic Press. pp. 287–319.
11. Averbeck B.B., Chafee M.V., Crowe D.A., Georgopoulos A.P. 2002. Parallel processing of serial movements in prefrontal cortex. *PNAS USA*. **99**. 13172–13177.
12. Hung C.P., Kreiman G., Poggio T., DiCarlo J.J. 2005. Fast readout of object identity from macaque inferior temporal cortex. *Science*. **310**. 863–866.
13. Koelsch S., Siebel W.A. 2005. Towards a neural basis of music perception. *Trends Cog. Sci.* **9 (12)**. 578–584.
14. Koelsch S. 2006. Significance of Broca's area and ventral premotor cortex for music-syntactic processing. *Cortex*. **42. Special Issue**.
15. Patel A.D. 2003. Language, music, syntax and the brain. *Nature Neurosci.* **6(7)**. 674–681.

Материал поступил в редакцию 27 октября 2006 г., опубликован 6 ноября 2006 г.