АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2006, том 52, № 4, с. 521–530

УДК 591.185.5:612.85

ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ЛИ СТРАТЕГИЯ ЭХОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЦЕЛЕЙ У ДЕЛЬФИНОВ СЛУХОВЫМ ПЕРИФЕРИЧЕСКИМ КОДИРОВАНИЕМ?

© 2006 г. Л. К. Римская-Корсакова, Н. А. Дубровский

Акустический институт им. Н.Н. Андреева РАН
117036 Москва, ул. Шверника 4
E-mail: lkrk@akin.ru

Поступила в редакцию 21.07.05 г.

Известно, что слух дельфинов анализирует тонкую частотную и временну́ю структуру коротких высокочастотных эхо-сигналов. Такой анализ можно объяснить на основе принципа залпов, в соответствии с которым слуховое периферическое кодирование сигналов определяется коллективным действием множества синхронно-возбужденных волокон слухового нерва. Кодирование будет эффективно, если чувствительность большинства волокон множества соответствует (близка) уровню синаптического потенциала, возникшего в ответ на стимул. При действии длительных сигналов такое соответствие возникло бы вследствие слуховой адаптации, подстраивающей чувствительность волокон к уровню синаптического потенциала. Однако дельфины распознают цели на основании анализа одного короткого эхо-сигнала и при эхолокации варьируют в широких пределах интенсивность зондирующих импульсов. В данной работе на модели периферии высокочастотной части слуха проверяется гипотеза о том, что варьирование интенсивности является адаптивным механизмом, подстраивающим интенсивность эхо-сигналов к той чувствительности волокон, которая возникла в результате действия окружающих шумов. Устанавливается, что необходимым условием для реализации принципа залпов также являются дифференцирующие свойства, присущие реакции множества волокон слухового нерва. Рассматривается модель распознавания коротких сигналов, имеющая в своем составе модель периферии, блоки минимизации описания сигналов и принятия решения. Обсуждается алгоритм модели эхолокационного распознавания малоразмерных целей, реализующий стратегию распознавания объектов у дельфинов.

PACS: 43.64.Bt, 43.64.Pg, 43.80.Lb, 43.60.Lq

При эхолокации подводных объектов дельфины применяют серии коротких высокочастотных импульсов. Пиковые значения импульсов в серии могут значительно меняться от импульса к импульсу [1–3]. Возникает вопрос, являются ли эти изменения следствием нестационарного процесса генерации локационных сигналов у дельфинов или они играют определенную роль в слуховом периферическом кодировании эхолокационных импульсов?

Периферическое кодирование стимулов подразумевает воспроизведение тонкой амплитудно-временно́й структуры стимулов в последовательностях потенциалов действия (спайков), генерируемых волокнами слухового нерва. Известно, что дельфины анализируют тонкую частотную и временну́ю структуру коротких высокочастотных эхо-импульсов [4–7]. Временно́е разрешение пар импульсов у дельфинов оценивается величиной менее сотни микросекунд [8, 9]. Такое разрешение нельзя объяснить свойствами одного волокна слухового нерва, поскольку постоянная времени интегрирования внутренних рецепторных волосковых клеток составляет 0.2–0.5 мс [10] и после генерации спайка волокна восстанавливают свою возбудимость в течение 5–20 мс (период рефрактерности) [11, 12]. Высокое временно́е разрешение может быть достигнуто в результате коллективного действия множества волокон, из-за спонтанной активности (СА) обладающих стохастическим характером реакции [14]. Морфологической особенностью слуха эхолоцирующих животных является увеличенная, по сравнению с другими животными [13], дивергенция возбуждения одной внутренней рецепторной волосковой клетки на множество нейронов спирального ганглия, с которыми эта клетка образует синаптические контакты. (Аксоны нейронов спирального ганглия образуют волокна слухового нерва. Адаптация характеризует снижение частоты импульсации клетки при действии длительных стимулов. Спонтанная активность – это свойство нервной клетки генерировать спайки в отсутствие стимула.) Модельные исследования показывают, что реакция множества высокочастотных волокон способна "преодолеть" инерционные

свойства отдельных волокон, если пороги чувствительности подавляющей части волокон множества соответствуют уровню синаптического потенциала, возникшего на стимул [15]. Если пороги выше, то волокна не реагируют вообще. Если пороги ниже, то реагируют только на начало стимула и воспроизводят временну́ю структуру стимула. Например, периферическое кодирование длительных звуков является динамическим процессом, сопровождающимся слуховой адаптацией [16]. Адаптация изменяет чувствительность волокон, подстраивая ее к уровню возникших синаптических потенциалов и, тем самым, способствует воспроизведению амплитудно-временны́х изменений структуры стимулов [17, 18]. Но как подстраивается чувствительность множества волокон к короткому стимулу? Как реализуется принцип залпов в слуховой системе дельфинов, если уровень возникшего синаптического потенциала не соответствует порогам чувствительности большинства волокон множества?

Дельфины распознают цели на основании одного короткого эхо-сигнала без накопления энергии повторяющихся эхо-сигналов [4, 5, 7, 8]. Звукоизлучающая система дельфинов оснащена способностью варьировать в широких пределах интенсивность зондирующих импульсов [1–2]. Такое варьирование позволяет дельфину поддерживать оптимальное отношение сигнал/помеха для эффективного обнаружения целей в разной шумовой обстановке и на разных дальностях. Однако дельфины варьируют интенсивность зондирующих импульсов и в условиях опытного бассейна, где есть постоянный шумовой и реверберационный фон и где фиксировано расстояние до обнаруживаемых целей. Нами обнаружено [3], что вариации интенсивности зондирующих импульсов при решении одной и той же эхолокационной задачи могут достигать 20 дБ. Может ли такое варьирование интенсивности зондирующих импульсов обеспечить подстройку возникающих синаптических потенциалов к порогам чувствительности волокон слухового нерва, определяемым шумами акватории, на фоне которых дельфин анализирует эхо-сигнал?

Проверим гипотезу о роли указанных вариаций в имитационном эксперименте на модели периферии высокочастотной части слуха. Рассмотрим те ее реакции, которые обеспечивают эффективное кодирование коротких сигналов в тишине и при наличии шума. Рассмотрим модель эхолокационного распознавания объектов, которая использует модель периферии слуха в качестве блока предварительной обработки, имеет блоки минимизации описания сигналов и принятия решения, а также учитывает взаимодействие приемной и излучающей систем дельфина.

Модель периферии высокочастотной части слуха состоит из множества моделей волокон слухового нерва, в которых воспроизведены основные этапы периферического преобразования звуков в последовательности спайков [15, 16, 19]. В моделях волокон предусмотрены следующие преобразования входного сигнала $X(t)$:

1. полосовая фильтрация (выходная функция $Y(t)$), такая же, как и на базилярной мембране (центральная частота полосового фильтра задает значение характеристической частоты (ХЧ) модели волокна);

2. компрессия и детектирование сигнала (выходная функция $R(t)$), воспроизводящая свойства внутренних волосковых клеток;

3. формирование синаптического шума (выходная функция $S(t)$) в виде случайного нормального процесса со средним значением и среднеквадратичным отклонением, пропорциональным величине $R(t)$, а также создание спонтанной активности путем увеличения среднеквадратичного значения синаптического шума на фиксированную величину;

4. низкочастотная фильтрация синаптического шума с постоянной времени 0.2 мс, моделирующая синаптический потенциал модели нейрона спирального ганглия; (выходная функция $G(t)$);

5. преобразование аналогового синаптического потенциала $G(t)$ в последовательность спайков Pi, генерируемую моделью нейрона, путем сравнения $G(t)$ с порогом $H(t)$;

6. изменение во времени порога нейрона $H(t)$ после генерации спайка (пороговая функция $H(t)$ позволяет учитывать свойства адаптации и рефрактерности в волокне).

Выходными реакциями моделей волокон являются последовательности спайков, генерируемые моделями нейронов спирального ганглия. Параметры моделей были выбраны так, чтобы воспроизвести известную связь между физиологическими свойствами волокон и его СА [16, 19]. Известно [20–24], чем больше СА в волокне, тем ниже его пороги реакции (1), тем большую крутизну имеет регистрируемая в волокне зависимость средней частоты импульсации от уровня тона характеристической частоты (2), тем хуже волокно воспроизводит огибающую синусоидально амплитудно-модулированного сигнала (3), тем менее выражены у этого волокна свойства адаптации (4).

Полная модель периферии слуха представляет собой набор моделей волокон с разными ХЧ и СА. Наиболее важным для задач настоящего исследования является этап преобразования аналогового синаптического потенциала модели одной рецепторной клетки в последовательность спайков, генерируемых множеством связанных с ней моделей нейронов спирального ганглия, поскольку на этом этапе реализуется принцип залпов и этот

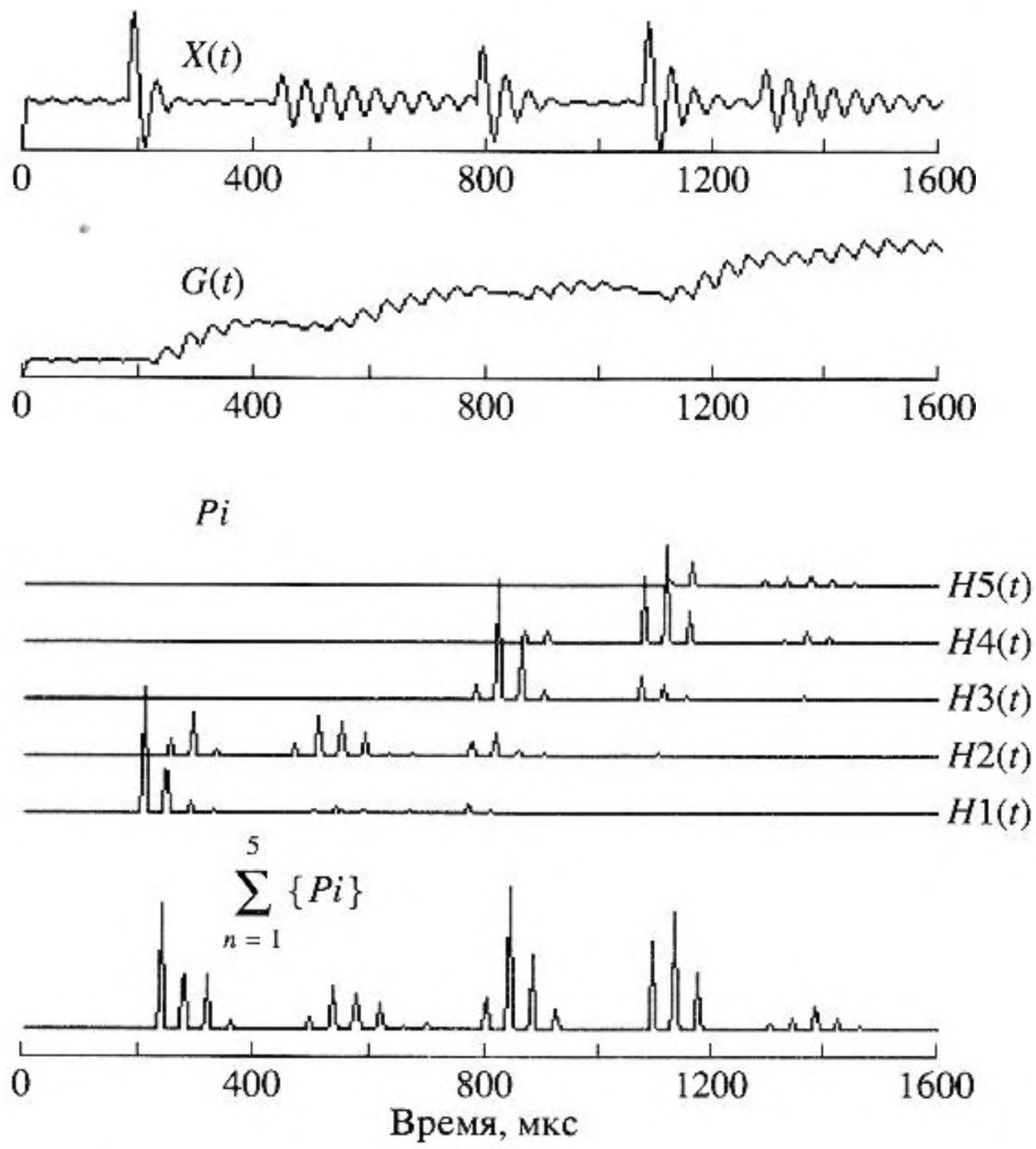

Рис. 1. Временны́е профили модельного сигнала $X(t)$, синаптического потенциала модели волосковой клетки $G(t)$, реакции пяти множеств моделей волокон, отличающихся порогами (внутри множества пороги реакций волокон одинаковы), а также суммарная реакция всех пяти множеств моделей $\Sigma\{Pi\}$. Самый низкий порог обозначен как $H1(t)$.

этап обеспечивает кодирование тонкой амплитудно-временно́й структуры коротких импульсов.

Данный этап преобразования обладает хорошо выраженными дифференцирующими свойствами, благодаря которым можно:

1. получить высокое временно́е разрешение коротких высокочастотных импульсов и восстановить широкую полосу частот анализируемого сигнала, уменьшенную инерционными свойствами рецепторных клеток;

2. подчеркнуть слабые импульсы эхо-сигналов на фоне более сильных;

3. подчеркнуть высокочастотные составляющие сигналов на фоне низкочастотных;

4. обеспечить инвариантность воспроизведения временно́й структуры коротких импульсов сигналов в шумах при изменении уровня сигналов.

Рассмотрим эти свойства подробнее.

Пример временно́го кодирования коротких высокочастотных сигналов $X(t)$ во множестве волокон с одинаковыми ХЧ, но разными порогами реакций (разной СА), иллюстрирует рис. 1. Временно́й профиль сигнала $X(t)$, являющегося моделью эхо-сигнала дельфина, содержит пять компонент. ХЧ волокон соответствует максимуму спектра сигнала $X(t)$ и составляет 25 кГц, что на порядок больше, чем верхняя граница низкочастотного фильтра (1 кГц), учитывающего интегрирующие свойства волосковых клеток. Отклики модели базилярной мембраны на каждый из пяти компонент $X(t)$ не перекрываются, но интегрирование сглаживает и затягивает синаптический потенциал $G(t)$.

Короткий высокочастотный стимул на периферии кодируется множеством волокон слухового нерва. В ответ на такой стимул каждое волокно множества из-за рефрактерности сгенерирует не более одного спайка, появление которого всегда приурочено к возрастающему участку синаптического потенциала. За счет этого суммарная реакция множества высокочастотных волокон обнаруживает дифференцирующие свойства и укорачивает сглаженные интегрированием рецепторные потенциалы (рис. 1).

Полный динамический диапазон синаптического потенциала $G(t)$ превысил динамический диапазон множества волокон с порогами $H1(t)$, но соответствовал динамическому диапазону нескольких множеств волокон с порогами $H1(t)$, $H2(t)$, $H3(t)$, $H4(t)$, $H5(t)$. Суммарная реакция волокон с разными порогами $\Sigma\{Pi\}$ воспроизводит си-

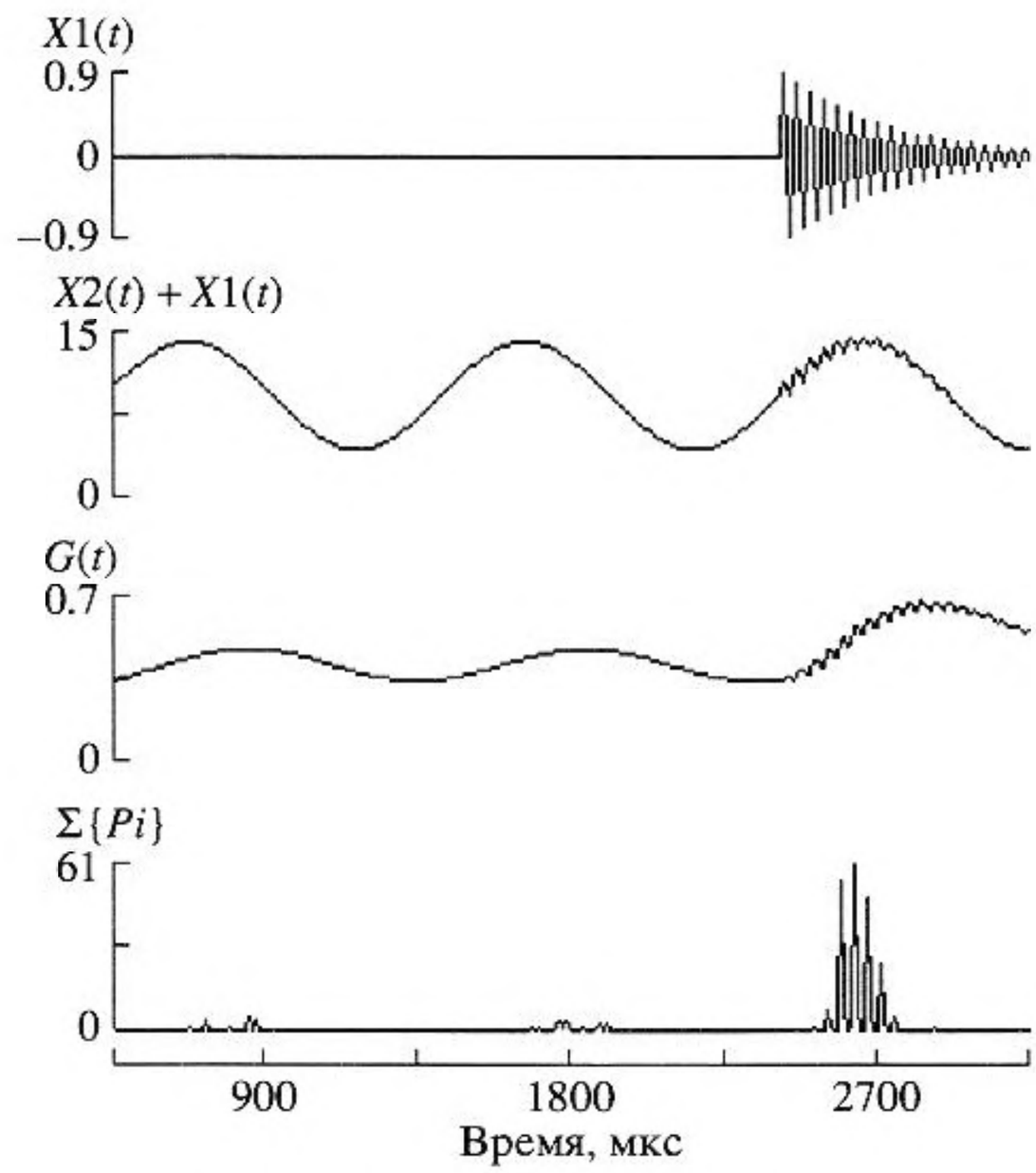

Рис. 2. Временны́е профили короткого импульса $X1(t)$ с максимумом спектра 25 кГц; суммы синусоидального сигнала $X2(t)$ с частотой 1 кГц и одиночного импульса $X1(t)$, амплитуда которого в 10 раз меньше амплитуды синусоидального сигнала, вызванного синаптического потенциала $G(t)$ и суммарной реакции $\Sigma\{Pi\}$ множества одинаковых волокон.

наптический потенциал $G(t)$, возникший в ответ на сигнал $X(t)$ (последняя строка, рис. 1). При этом за счет интегрирующих свойств рецепторных клеток все слабые компоненты сигнала $X(t)$ хорошо обнаруживаются в суммарной реакции $\Sigma\{Pi\}$.

Таким образом, короткий высокочастотный сигнал вызывает однократную реакцию каждого волокна. Суммарная реакция множества волокон, отличающихся ХЧ и СА, воспроизводит тонкую частотную и временну́ю структуру коротких высокочастотных сигналов и подчеркивает относительно слабые компоненты на фоне более сильных, благодаря дифференцирующим свойствам суммарной реакции и интегрирующим свойствам внутренних рецепторных волосковых клеток.

Дифференцирующие свойства суммарной реакции множества волокон показаны на рис. 2. Для наглядности сигнал $X(t)$ подавался на вход модели рецепторной клетки, минуя полосовой фильтр, имитирующий фильтрующие свойства базилярной мембраны. Сигнал $X(t)$ являлся суммой двух составляющих $X1(t)$ и $X2(t)$, т.е. импульса с максимумом спектра, равным 25 кГц, и тона с частотой 1 кГц и амплитудой, в 10 раз большей амплитуды импульса. Возникший синаптический потенциал $G(t)$ и суммарная реакция множества волокон с одинаковыми порогами $\Sigma\{Pi\}$ показаны в двух нижних строках рис. 2. Суммарная реакция множества волокон, соответствующая высокочастотной и низкоамплитудной составляющей $X1(t)$, заметно превышает реакцию, соответствующую низкочастотной и высокоамплитудной составляющей $X2(t)$.

Дифференцирующие свойства суммарной реакции множества волокон, возникающие на этапе аналогово-импульсного преобразования, представляются весьма важными для понимания механизмов слухового временно́го анализа в целом. Они могут объяснять, почему частота огибающей амплитудно-модулированного сигнала воспроизводится в реакциях реальных нейронов с ХЧ, совпадающей с частотой несущей сигнала (высокочастотной составляющей), а не в реакциях нейронов с ХЧ, совпадающей с частотой огибающей (низкочастотной составляющей).

Еще одним важным условием для реализации принципа залпов, позволяющего кодировать тонкую временну́ю структуру коротких импульсов, является соответствие порогов чувствительности множества волокон значению синаптического потенциала, возникающего в ответ на сигнал. Чувствительность принципа залпов к интенсивности эхо-сигналов демонстрирует рис. 3. На рисунке показаны реакции множества волокон слухового нерва, полученные в ответ на сигнал $X(t)$, составленный из двух равновеликих импульсов с максимумом спектра 10 кГц. ХЧ волокон были также равны 10 кГц.

Степень воспроизведения временно́й структуры сигнала, составленного из пары импульсов, в импульсной реакции множества волокон количественно можно оценить по относительной амплитуде реакций на второй импульс $N2/N1$, где $N1$ и $N2$ – суммы спайков, возникшие в ответ на первый и второй импульсы за одинаковые промежутки времени. Если $N2/N1$ достигает единицы, тогда можно утверждать, что временна́я структура пары импульсов воспроизводится в суммарной реакции множества волокон.

Во множестве волокон реакция на второй импульс может возникнуть только двумя способами [19]. Первый, "стохастический" способ предусматривает появление реакции в тех волокнах, которые не среагировали на первый импульс. В его основе лежит стохастическая реакция каждого волокна множества, обусловленная СА. Второй, "детерминированный" способ предусматривает появление реакций в уже ответивших волокнах, у которых с течением времени понизился порог реакции (или возросла чувствительность) после генерации спайка на первый импульс. Вклад каждого из способов в суммарную реакцию можно оценить, вычисляя возникшие на второй импульс реакции в волокне при условии отсутствия $Ns2$ и

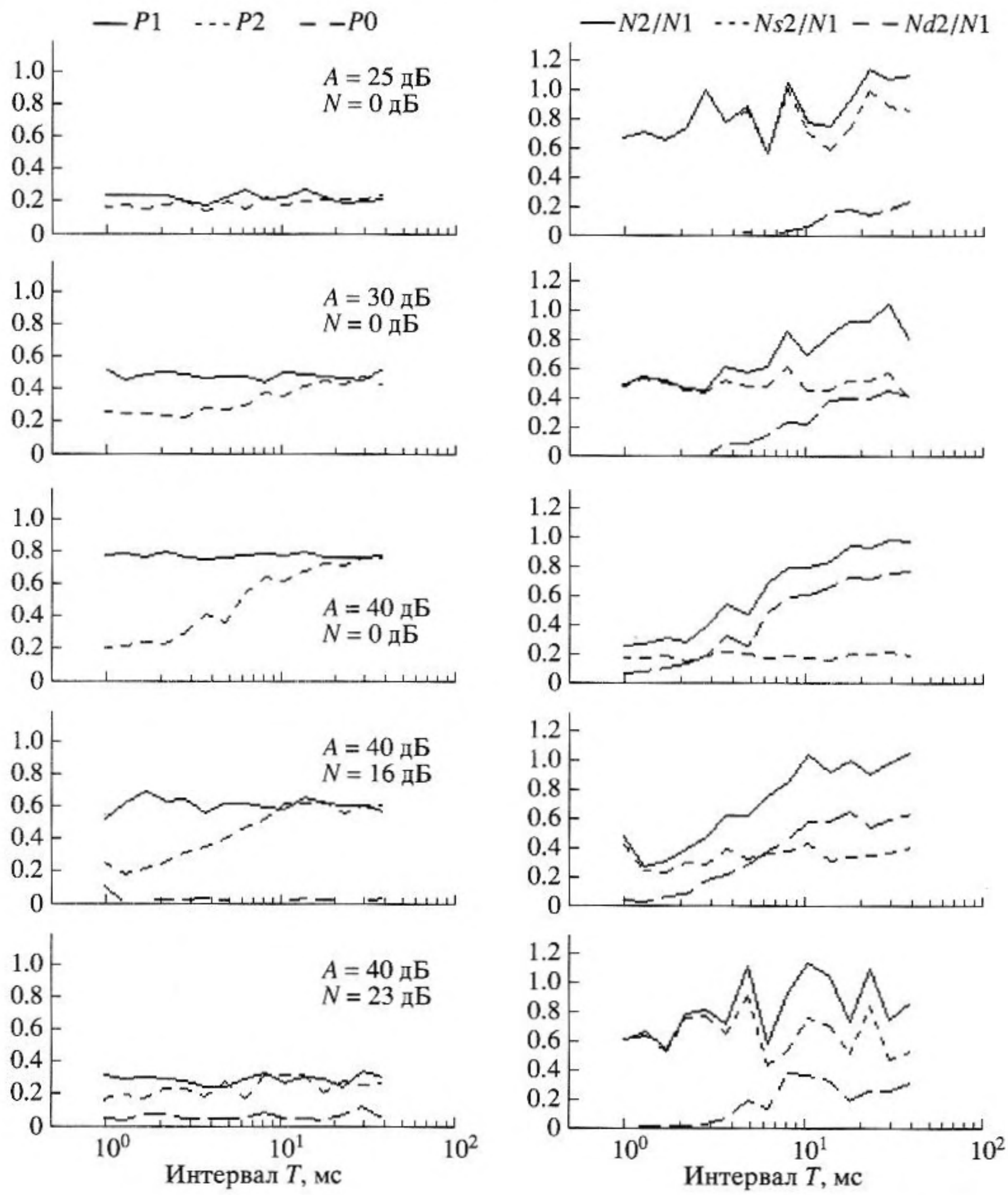

Рис. 3. Вероятности реакций на шум *P*0, первый *P*1 и второй *P*2 импульсы, а также зависимости относительных амплитуд реакций на второй импульс *N*2/*N*1, *Ns*2/*N*1 и *Nd*2/*N*1 от значений интервалов в парах. Модель эхо-сигнала *X*(*t*) – пара равновеликих импульсов, предъявляемая в тишине и на фоне шума. В качестве параметров указаны уровни импульсов и шумов. На оси ординат: слева – вероятности появления реакций за равные промежутки времени на 100-кратное предъявление сигнала; справа – относительные амплитуды реакций, возникшие на второй импульс.

возникновения *Nd*2 реакции на первый импульс. Так как *N*2 = *Ns*2 + *Nd*2, то *Ns*2 и *Nd*2 – стохастическая и детерминированная составляющие реакции на второй импульс. На стохастические реакции не влияют рефрактерные свойства волокон, и поэтому такие реакции воспроизводят свойства синаптических потенциалов, возникших в ответ на стимул. Рефрактерные свойства влияют на детерминированные реакции. Изучая зависимость изменений *N*2/*N*1 и двух ее составляющих *Ns*2/*N*1 и *Nd*2/*N*1 от разных параметров стимулов, можно определить условия, при которых суммарные реакции множества волокон воспроизводят временну́ю структуру стимула.

Вероятности реакций на шум *P*0, первый *P*1 и второй *P*2 импульсы, а также зависимости относительных амплитуд реакций на второй импульс *N*2/*N*1, *Ns*2/*N*1 и *Nd*2/*N*1 от значений интервалов в парах представлены на рис. 3. Зависимость *N*2/*N*1 от значений интервалов обычно называют функцией восстановления реакции. Пары импульсов предъявлялись в тишине (первые три строки

рис. 3) и на фоне широкополосных шумов (последние две). Интервалы T между импульсами варьировали от 1 до 50 мс. Поскольку выходную реакцию множества волокон получаем, многократно испытывая модель одного и того же волокна, предъявляя один и тот же сигнал, постольку вероятность реакции на импульс оцениваем отношением числа возникших спайков к числу предъявлений сигналов.

Если возникшие на пары импульсов значения синаптических потенциалов находятся вблизи порога реакции большинства волокон (первая строка, рис. 3), то при любых T вероятности появления реакций на первый и второй импульсы ($P1$ и $P2$) малы, но одинаковы (слева). Реакция на второй импульс в основном формируется стохастическим способом, поскольку $Nd2 = 0$. Временна́я структура стимула воспроизводится в реакции множества волокон в исследованном диапазоне интервалов T, так как $N2/N1 = Ns2/N1 = 1$ (справа).

При повышении интенсивности импульсов сначала до 30 дБ, а потом и до 40 дБ, при небольших интервалах между импульсами (вторая и третья строки, рис. 3), вероятности появления реакций на первый импульс $P1$ возрастают до максимума (слева), а стохастическая составляющая амплитуды второго импульса $Ns2/N1$ уменьшается до минимума (справа). Т.е. практически все волокна множества реагируют на первый импульс, а из-за рефрактерности, практически ни один – на второй импульс. При малых значениях T временна́я структура стимула не воспроизводится в реакции множества волокон. Возбудимость волокон восстанавливается постепенно: с течением времени повышается вероятность $P2$ (справа), а также возрастает детерминированная составляющая $Nd2/N1$ и амплитуда $N2/N1$ (слева).

Временна́я структура пары импульсов воспроизводится в реакции множества волокон при любых значениях интервалов, когда уровень импульсов находится вблизи порога реакции множества волокон и когда реакция на второй импульс формируется стохастическим способом (рис. 3, первая строка). Если стимул имеет длительность меньшую, чем рефрактерный период, и высокую интенсивность, то, вследствие дифференцирующих свойств реакции множества волокон временна́я структура пары импульсов не воспроизводится. Следовательно, принцип залпов реализуется, когда реакции волокон на импульсы пары формируются стохастическим способом, когда вклад стохастической составляющей в общую реакцию на второй импульс превышает вклад детерминированной (реакции, представленные на рис. 1 и 2, получены именно для такого случая).

Увеличить вклад стохастической составляющей и, следовательно, восстановить способность множества к воспроизведению временно́й структуры стимула, можно путем добавления к стимулу внешнего шума, который десинхронизирует реакцию множества волокон, возникающую на первый импульс. Как видно из рис. 3 (две последние строки), увеличение уровня внешнего шума хотя и понижает вероятности появления реакций на каждый из импульсов пары $P1$ и $P2$ (слева), но повышает вклад стохастической составляющей $Ns2/N1$ в реакцию на второй импульс $N2/N1$ (справа), и, следовательно, восстанавливает способность множества к воспроизведению структуры пары импульсов.

Различия вкладов двух составляющих в возникшую на второй импульс реакцию, полученную при предъявлении пар импульсов в тишине и шуме, позволяет обнаружить рис. 4. Интервал между импульсами был меньше рефрактерного периода. Если стимул предъявлялся в тишине, то вблизи порога обнаружения стимула вероятности $P1$ и $P2$ одинаковы (первая строка, справа), а суммарная амплитуда второго импульса $N2/N1$ равна 1 (слева), так как они сформированы стохастически. Изменение интенсивности ведет к перераспределению вкладов двух составляющих в реакцию на второй импульс. Рост интенсивности уменьшает стохастическую $Ns2/N1$ и увеличивает детерминированную $Nd2/N1$ составляющие. Так как интервал между импульсами меньше рефрактерного периода, то максимальное значение детерминированной составляющей $Nd2/N1$ равно 0.5. Вследствие перераспределения вкладов двух составляющих с ростом интенсивности импульсов, суммарная амплитуда реакции на второй импульс $N2/N1$ уменьшилась от 1 до 0.5. Внешний шум повысил порог обнаружения пары импульсов на 6 дБ (вторая строка справа) и вклад стохастической составляющей (слева). Шум создал условия для появления реакции на второй импульс при тех интенсивностях, при которых в тишине реакция на импульс была ослаблена рефрактерностью: $N2/N1$ была больше в шуме, чем в тишине.

Величина сдвига порога обнаружения пары импульсов зависит от уровня внешнего шума. Поэтому для каждого уровня шума существует определенный диапазон уровней импульсов вблизи порога обнаружения, при котором воспроизводится временна́я структура пары импульсов или реализуется стохастический способ формирования реакций на второй импульс.

Таким образом, варьирование уровня внешнего шума обеспечивает эффективное кодирование структуры короткого стимула, инвариантное к его интенсивности. Если же стимул действует на фоне шума фиксированного уровня, то эффективное кодирование стимула обеспечит варьирование его интенсивности. Варьирование позволит

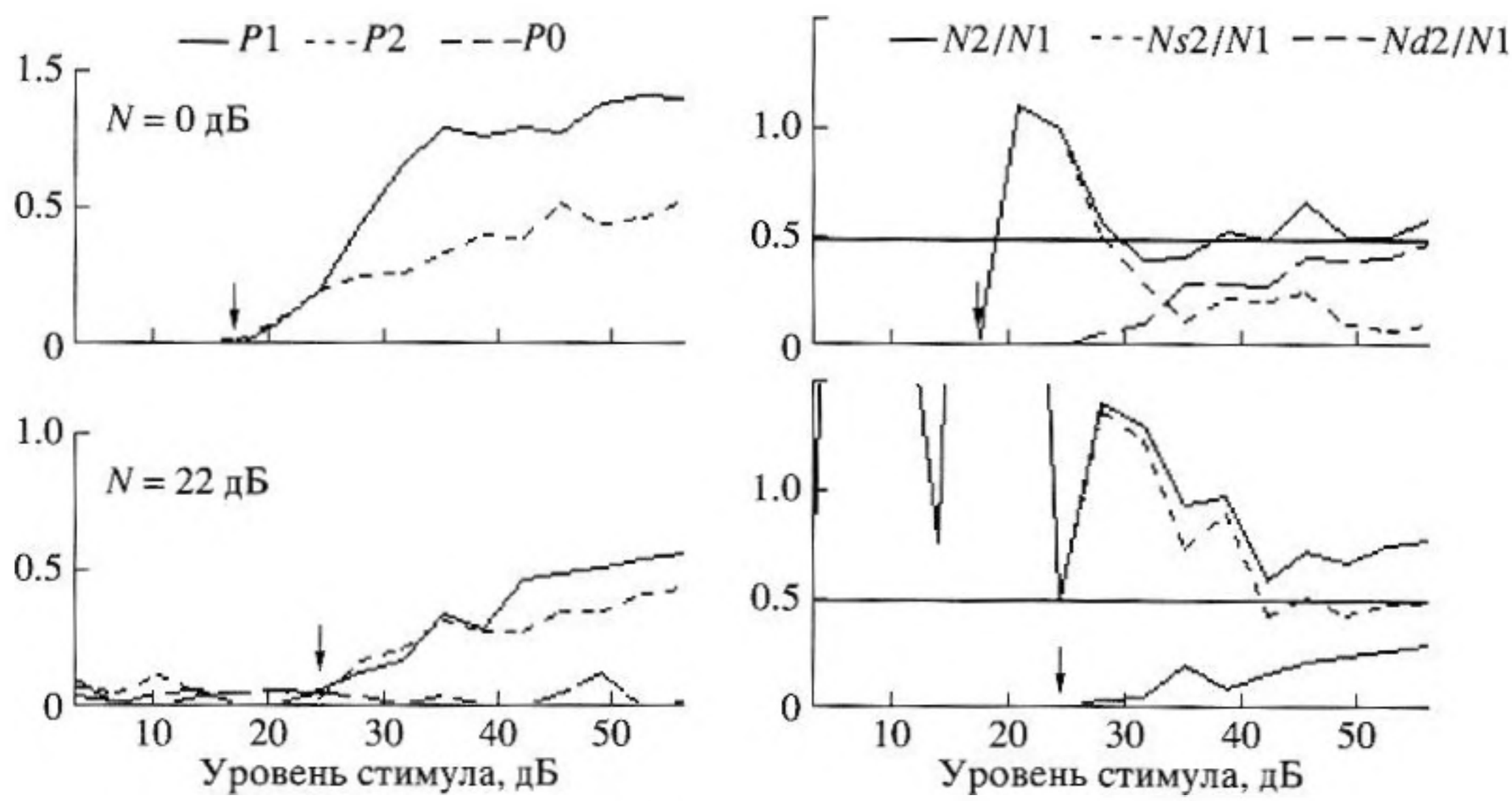

Рис. 4. Вероятности реакций на шум $P0$, первый $P1$ и второй $P2$ импульсы, а также зависимости относительных амплитуд реакций на второй импульс $N2/N1$, $Ns2/N1$ и $Nd2/N1$ от значений уровня импульсов в парах. Модель эхо-сигнала $X(t)$ – пара равновеликих импульсов, отстоящих на 4 мс один от другого, предъявляемых в тишине и на фоне шума. Стрелки отмечают порог обнаружения импульсов. Параметр – уровень шума в дБ. На оси абсцисс – уровень импульсов в дБ. По оси ординат: слева – вероятности появления реакций за равные промежутки времени на 100-кратное предъявление сигнала; справа – относительные амплитуды реакций, возникшие на второй импульс.

подстроить сигнал к той чувствительности волокон слухового нерва, которая возникла в результате действия шумов, окружающих стимул.

Представленные результаты модельных экспериментов позволяют предположить, что варьирование интенсивности зондирующих импульсов при решении дельфином эхолокационных задач является целенаправленным действием. Оно подстраивает уровень возникшего на эхо-сигнал синаптического потенциала к заданной внешним шумом чувствительности волокон слухового нерва и, тем самым, способствует эффективному кодированию коротких стимулов. Данная гипотеза объясняет, почему дельфины варьируют интенсивность зондирующих сигналов [1, 2]. Периферическое временно́е разрешение может быть выше для высокочастотных, чем для низкочастотных сигналов, так как в кодировании высокочастотных сигналов участвует множество волокон, суммарная реакция которых обнаруживает дифференцирующие свойства и укорачивает затянутые интегрированием возникшие синаптические потенциалы.

Исходя из стратегии эхолокационного распознавания целей у дельфинов, можно предложить следующий алгоритм и модель системы распознавания объектов. В систему распознавания модель периферии включена в качестве блока предварительной обработки сигнала [25, 26].

В данной работе и ранее [15] нами показано, что однократная и практически синхронная во времени реакция множества волокон с разными ХЧ и СА содержит полную информацию о тонкой частотно-временной структуре коротких высокочастотных эхо-сигналов. Так как эта информация явно избыточна и не удобна для построения системы распознавания, был предложен следующий способ минимизации описания короткого эхо-сигнала [25]. Во множестве однократно возбужденных волокон с разными ХЧ и СА, короткий сигнал оставляет след возбуждения или создает локальные зоны возбуждения. Минимизированное описание сигнала можно составить путем вычисления адресов локальных зон возбуждения в координатах "частота канала–время появления возбуждения–число возбужденных волокон". В частотном канале, включающем набор волокон с одинаковыми ХЧ и СА, по началу и концу возбуждения (см. рис. 1) можно вычислить средний на временно́й шкале адрес зоны возбуждения и приписать ему среднюю величину возбуждения. Предполагая, что в величине и адресе зон возбуждения содержится полная информация о сигнале, вполне можно минимизировать описание сигнала до N-мерного вектора с указанными координатами "частота канала–время появления возбуждения–величина возбуждения".

Проверка эффективности данного способа минимизации описания проводилась на модели распознавания, в которой в качестве решающего правила применялся алгоритм отображения многомерных векторов точкой на плоскости. При отображении использовался способ нелинейного масштабирования [27]. Каждому многомерному

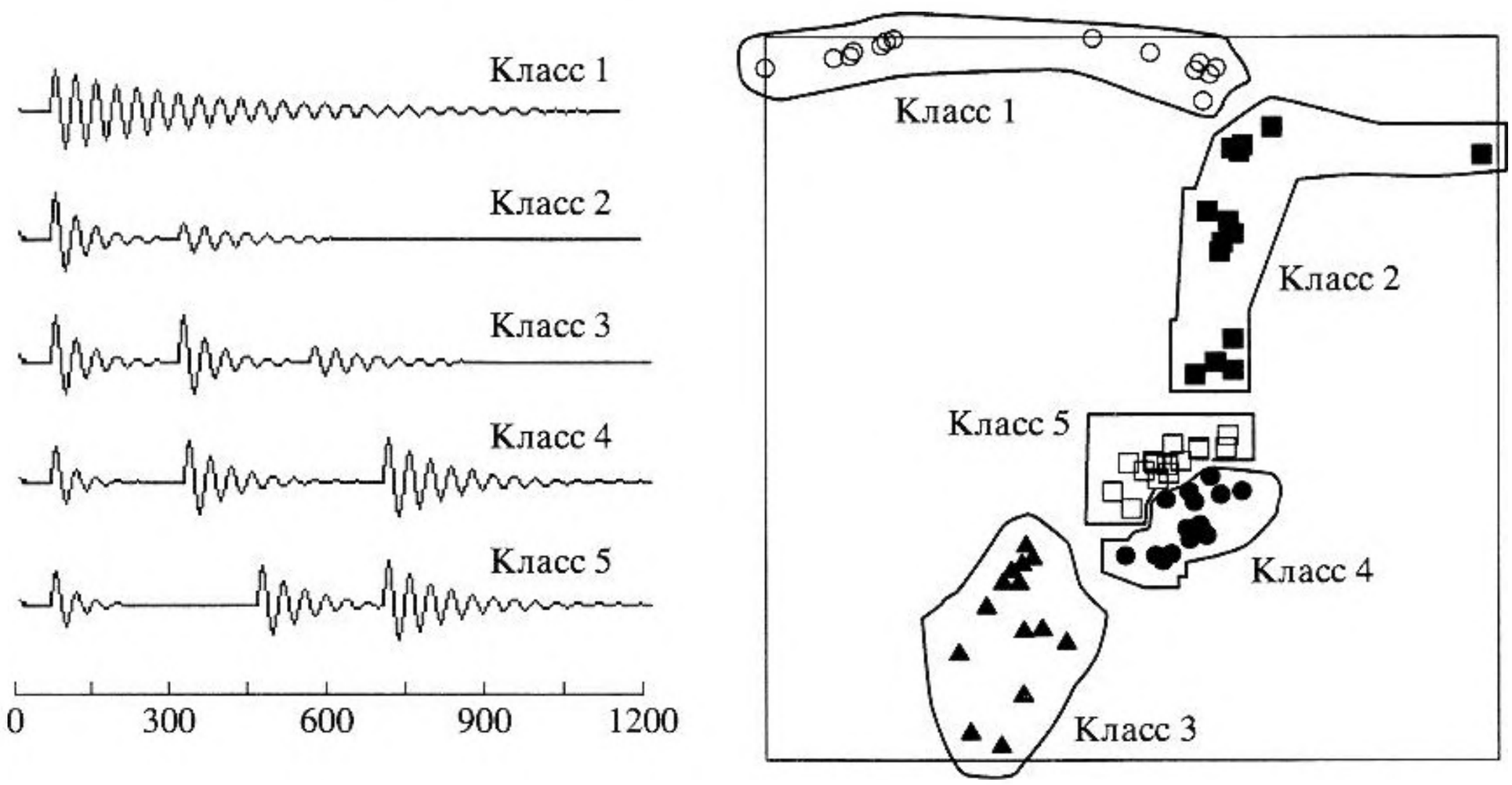

Рис. 5. Примеры временны́х профилей пяти классов модельных эхо-сигналов (слева), а также результат отображения многомерных векторов этих классов эхо-сигналов точкой на плоскости (справа). По оси абсцисс (слева) – время в мкс, по оси ординат – мгновенные значения эхо-сигналов. Одна точка на плоскости (справа) соответствует одной реализации эхо-сигнала.

вектору в исходном пространстве соответствовала точка на плоскости. Если структура векторов, принадлежащих одному классу объектов, однородна, то на плоскости образуются области, в которых хорошо группируются точки, соответствующие объектам класса.

Для испытания модели распознавания были выбраны пять классов модельных сигналов с максимумами спектров 25 кГц (рис. 4, слева). Класс 1 составляли сигналы, имевшие в своем составе одну компоненту, класс 2 – две, а классы 3, 4, 5 – три компоненты. Классы 4 и 5 отличались друг от друга моментом появления второй компоненты. Класс 3 отличался от класса 4 моментом появления третьей компоненты и ее уровнем. Для каждого класса сигналов формировали по пятнадцать реализаций, путем одновременного введения небольшой случайной вариации значений интервалов между компонентами, длительности и амплитуды компонент, а также центральной частоты сигнала. Блок предварительной обработки содержал модели волокон с ХЧ, равными 20, 25 и 30 кГц. Для каждой из 15 реализаций пяти классов сигналов формировались тридцатимерные векторы адресов локальных зон возбуждения.

Результат отображения 75 векторов точкой на плоскости представлен на рис. 4 (справа). Поскольку алгоритм отображения предусматривал формирование границ классов сигналов, постольку легко обнаружить, что точки, соответствующие сигналам, имевшим одну, две или три компоненты, сгруппированы на плоскости в областях с хорошо выделенными границами. Сигналы классов 3, 4, 5, имевшие по три компоненты, образовали три близко расположенных, но не перекрывающихся области. Подобный результат был получен, когда вместо искусственно сформированных эхо-сигналов были использованы реализации реальных эхо-сигналов от подводных объектов четырех классов: донная реверберация, полая сфера, полый цилиндр и камень.

Рассмотренная выше модель оказалась пригодной для решения пяти- и четырехклассовой задачи распознавания коротких сигналов в условиях, благоприятных для функционирования принципа залпов, при условии, что уровни сигналов соответствовали порогам чувствительности множества моделей волокон. Обеспечить же функционирование модели распознавания в широком диапазоне интенсивностей сигналов и при наличии шумов можно, реализуя стратегию эхолокационного распознавания объектов у дельфинов, т.е. учитывая механизм адаптивной подстройки уровня сигналов.

В системе распознавания необходимо предусмотреть взаимодействие приемной и излучающей систем. Система распознавания анализирует эхо-сигналы от малоразмерных целей после их облучения короткими зондирующими сигналами. Используемое решающее правило – алгоритм отображения многомерных векторов точкой на плоскости – заменяется искусственной нейронной сетью [28], обученной распознаванию необходимого числа классов сигналов от целей при оптимальных интенсивностях эхо-сигналов. На этапе экзамена (в рабочем режиме) система распозна-

вания целей компенсирует отсутствие оптимальной интенсивности эхо-сигналов так же, как и дельфин, – подстройкой пикового значения зондирующих импульсов к чувствительности элементов блока предварительной обработки. По каждому отдельному принятому эхо-сигналу принимается решение о принадлежности его к какому-либо из классов целей. Такая модель эхолокационного распознавания целей, использующая в качестве блока предварительной обработки модель периферии слуха, будет отличаться от обычных систем распознавания тем, что она ориентирована не на выделение определенных признаков сигналов, а на выделение любых частотно-временны́х изменений, возникших в сигнале. При этом адаптивные механизмы подстройки чувствительности системы к уровню эхо-сигнала заменяются целенаправленными изменениями интенсивности зондирующих импульсов.

Авторы выражают глубокую признательность А.П. Чижову за помощь в разработке системы распознавания.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 03-04-48746.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Au W.W.L.* Automatic gain control in the echolocation system of dolphins // Nature. 2003. P. 861–863.
2. *Ау У.УЛ.* Эхолокационные сигналы, издаваемые дикими дельфинами // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 4. С. 533–542.
3. *Дубровский Н.А., Римская-Корсакова Л.К., Трошенкова Р.П.* О целенаправленных вариациях дельфином интенсивности зондирующих импульсов. // Доклады XI Всесоюзной Акустической конференции. М., 1991. Секция Ц. С. 9–12.
4. *Айрапетьянц Э.Ш., Константинов А.И.* Эхолокация в природе. Л.: Наука, 1974. 512 с.
5. *Белькович В.М., Дубровский Н.А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л.: Наука, 1976. 204 с.
6. *Супин А.Я., Попов В.В., Клишин В.О.* Особенности слухового восприятия амазонского дельфина. В кн. Амазонский дельфин. Ред.: В.Е. Соколов. М.: Наука, 1996. С. 214–237.
7. *Au W.W.L.* The Sonar of Dolphin. N.Y.: Springer – Verlag, 1993. 184 p.
8. *Дубровский Н.А.* Эхолокационный анализатор черноморской афалины. В кн. Черноморская афалина. Ред.: В.Е. Соколов, Е.В. Романенко. М.: Наука, 1997. С. 544–574.
9. *Заславский Г.Л., Рябов В.А.* Измерение афалиной интервалов времени // Доклады XI Всесоюзной акустической конференции. М., 1991. Секция Ц. С. 33–35.
10. *Russell I.J., Cody A.R., Richardcon G.P.* The responses of inner and outer hair cells in the basal turn of the guinea-pig cochlea and in the mouse cochlea grown in vitro // Hear. Res. 1986. V. 22. № 1–3. P. 199–216.
11. *Радионова Е.А.* Анализ звуковых сигналов в слуховой системе. Нейрофизиологические механизмы. Л.: Наука, 1987. 272 с.
12. *Parham K., Zhao H.B., Kim D.O.* Responses of auditory nerve fibers of the unanesthetized decerebrare cat to click pairs as simulated echoes // J. Neurophysiol. 1996. V. 76. P. 17–29.
13. *Богословская Л.С., Солнцева Г.Н.* Слуховая система млекопитающих: сравнительно-физиологический очерк. М.: Наука, 1979. 239 с.
14. *Wever E.G.* Theory of hearing. N.Y.: Dover Press, 1949.
15. *Римская-Корсакова Л.К., Дубровский Н.А.* Слуховой анализ импульсных звуков: имитационное моделирование на ЭВМ // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. № 1. С. 92–107.
16. *Rimskaya-Korsakova L.K., Telepnev V.N., Dubrovskii N.A.* Dynamic encoding of amplitude-modulated sounds at the level of auditory nerve fibers // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2005. V. 35. № 1. P. 71–81.
17. *Грин Н., Стаут У., Тейлор Д.,* (Green N.P.O., Stout G.W., Taylor D.J) Биология: в 3-х т. Т. 2. Пер. с англ. Под ред. Р. Сопера. 2-е изд. М.: Мир, 1996. 325 с.
18. *Eggermont J.* Between sound and perception: reviewing the search for a neural code // Hear. Res. 2001. V. 157. P. 1–42.
19. *Римская-Корсакова Л.К.* Временное разрешение и временное интегрирование коротких импульсов на периферии слуховой системы эхолоцирующих животных // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 3. С. 397–410.
20. *Libernam M.C.* Auditory nerve responses from cats raises in a low-noise chamber // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 63. P. 442–455.
21. *Geisler C.D., Deng L., Greenberg S.* Thresholds for primary auditory fibers using statistically defined criteria // J. Acoust. Soc. Am. 1985. V. 77. P. 1102–1109.
22. *Winter I.M., Robertson D., Yates G.K.* Diversity of characteristic frequency rate- intensity functions in guinea pig auditory nerve fibres // Hear. Res. 1990. V. 45. 191–202.
23. *Rhode W.S., Greenberg S.* Encoding of amplitude modulation in the cochlear nucleus of the cat // J. Neurophysiol. 1994. V. 71. P. 1797–1825.
24. *Frisina R.D.* Subcortical neural coding mechanisms for auditory temporal processing // Hear. Res. 2001. V. 158. № 1. P. 1–27.

25. *Dubrovsky N.A., Rimskaya-Korsakova L.K.* A simulation network of first order auditory neurons for preprocessing of acoustic signals // In: Proceedings 1994 IEEE OCEANS, IEEE Catalog № 94CH3472-8. V. 2. P. 235–238.

26. *Dubrovsky N.A., Rimskaya-Korsakova L.K.* The sound modulation extraction by an auditory system model with a neural network // Pattern Recogn. and Image Analys. 1996. V. 6. № 4. P. 780–785.

27. *Sammon Jr. J.W.* A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers, 1969. V. 18. P. 401–409.

28. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия-Телеком, 2001. 382 с.

Dolphin's Echolocation Strategy of Target Identification: Is It Determined by the Peripheral Auditory Encoding?

L. K. Rimskaya-Korsakova and N. A. Dubrovsky

Andreev Acoustics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Shvernika 4, Moscow, 117036 Russia

e-mail: lkrk@akin.ru

Abstract—It is well known that the auditory system of dolphins is capable of analyzing the fine frequency–time structure of short high-frequency echo signals. This can be explained by the burst principle, according to which the auditory peripheral encoding of signals is determined by the collective effect of a multitude of synchronously excited auditory nerve fibers. Encoding is efficient when the sensitivity of the majority of the fibers corresponds (is close) to the level of the synaptic potential evoked by the stimulus. Under the effect of long signals, such a correspondence is achieved as a result of auditory adaptation, which adjusts the sensitivity of the fibers to the synaptic potential level. However, dolphins identify the target by analyzing a single short echo signal, but, in the course of echolocation, they vary the intensity of the probing pulse over wide limits. In this paper, a model of the high-frequency auditory periphery is used to test the hypothesis that the intensity variation is an adaptive mechanism serving for the adjustment of the intensity of echo signals to the fiber sensitivity, which is formed under the effect of ambient noise. It is found that a necessary condition for the realization of the burst principle is the presence of the differentiating properties inherent in the response of the multitude of auditory nerve fibers. The identification of short signals is interpreted in terms of the model that includes a model of the auditory periphery and units serving for the minimization of signal description and for taking the decisions. A model algorithm of small-size target identification by echolocation, which realizes the object identification strategy used by dolphins, is discussed.