

В.Г. Редько

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Москва, Россия
vcredko@gmail.com

Взаимодействие между обучением и эволюцией

Аннотация. Построена и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюцией. Изучен механизм генетической ассимиляции приобретаемых навыков в течение ряда поколений дарвиновской эволюции. При генетической ассимиляции индивидуально приобретаемые путем обучения навыки «переизобретаются» эволюцией и записываются непосредственно в генотип особей. Показано, что генетическая ассимиляция происходит следующим образом: при обучении и дальнейшем отборе фенотипы особей смещаются в сторону оптимума, вследствие этого генотипы отобранных особей также приближаются к оптимуму. Изучен механизм эффекта экранирования, приводящего к тому, что сильное обучение тормозит эволюционный поиск. Проанализирован механизм влияния нагрузки на обучение, которая приводит к значительному ускорению эволюции.

Введение

Попытки моделирования и анализа взаимодействия между обучением и эволюцией проводились рядом авторов. В частности, в работе Хинтона и Новлана [1] было продемонстрировано, что обучение может направлять эволюционный процесс к нахождению оптимума. В работе Мейли [2] было показано, что сильное обучение может и препятствовать эволюционной оптимизации, если обучение увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа особи. Этот эффект был назван в [2] эффектом экранирования. Суть этого эффекта состоит в том, что, если обучение достаточно сильно меняет фенотип особей и особи отбираются при эволюции в соответствии с фенотипом, то отбор, определяемый фенотипом, может слабо зависеть от генотипа. В [2] было также учтено, что процесс обучения может иметь дополнительную нагрузку на особь и приспособленность особи может уменьшаться под влиянием этой нагрузки.

Настоящая работа развивает исследования [1,2], в ней построена и исследуется модель взаимодействия между обучением и эволюционной оптимизацией. Однако в [1,2] были использованы довольно сложные схемы генетического алгоритма со скрещиванием, поэтому был продемонстрирован сам эффект влияния, а механизмы взаимодействия между обучением и эволюцией не были четко проанализированы. В

отличие от [1,2], используем одну из наиболее четких моделей эволюции – модель квазивидов [3] и количественные оценки эффективности эволюционных алгоритмов [4]. Модель квазивидов рассматривает процесс эволюции, основанный на отборе и мутациях генотипов особей (без скрещивания), и характеризует основные свойства эволюционного процесса. Использование моделей и методов работ [3,4] позволяет получить четкое понимание механизмов взаимодействия обучения и эволюции.

Описание модели

Рассматриваем эволюционирующую популяцию модельных особей. Считаем, что каждая особь имеет генотип и фенотип. Генотип и фенотип особи определяются одинаковыми цепочками символов, равных 0 либо 1. Длина этих цепочек равна N .

Например, можно считать, что генотип кодируется модельной цепочкой ДНК, «буквы» которой равны 0 либо 1, а фенотип определяется нейронной сетью особи, при этом веса синапсов нейронной сети также равны 0 либо 1.

Популяция состоит из n особей, генотипы которых равны S_{Gk} , $k = 1, \dots, n$. Генотип особи S_{Gk} представляет собой цепочку символов S_{Gki} , $i = 1, \dots, N$. Длина цепочки N и численность популяции n велики: $N, n \gg 1$, $2^N \gg n$. N и n не меняются в ходе эволюции. Символы S_{Gki} равны 0 либо 1. Генотипы исходной популяции случайны.

При размножении потомки наследуют генотипы своих родителей S_{Gk} . Генотип особи не меняется в течение ее жизни и передается (с малыми мутациями) потомкам особи. Мутации состоят в случайной замене символов S_{Gki} .

Фенотипы особей равны S_{Pk} . В момент рождения особь получает генотип S_{Gk} , а ее фенотип S_{Pk} в этот момент времени t равен полученному генотипу: $S_{Pk}(t=1) = S_{Gk}$. После рождения особи живут в течение T тактов времени, T – время жизни одного поколения. Время дискретно: $t = 1, \dots, T$. Фенотип S_{Pk} меняется в течение жизни особи путем обучения.

Предполагается, что имеется оптимальная цепочка S_M длины N (компоненты которой также равны 0 или 1), которая ищется в процессе эволюции и обучения особей. При моделировании цепочка S_M задавалась случайным образом.

Обучение происходит методом проб и ошибок. При обучении меняются текущие символы фенотипа S_{Pk} : каждый такт времени t каждый символ S_{Pki} меняется на случайный (равный 0 либо 1), и если новый символ S_{Pki} совпадает с соответствующим символом S_{Mi} оптимальной цепочки S_M , то этот символ сохраняется, в противном случае происходит возврат к старому символу фенотипа S_{Pk} . Таким

образом, при обучении происходит приближение фенотипов S_{P_k} к оптимальной цепочке S_M .

В конце поколения происходит отбор особей в соответствии с их приспособленностями, определяемыми конечными фенотипами в такт времени $t = T$. Обозначим $S_{F_k} = S_{P_k}(t=T)$. Приспособленность k -й особи определяется расстоянием по Хеммингу $\rho(S_{F_k}, S_M)$ между S_{F_k} и S_M :

$$f_k = \exp[-\beta\rho(S_{F_k}, S_M)] + \varepsilon, \quad (1)$$

где β – положительный параметр, характеризующий интенсивность отбора, $0 < \varepsilon \ll 1$. Роль слагаемого ε можно рассматривать как влияние случайных факторов на приспособленность особей.

Отбор особей в новое поколение производится хорошо известным рулеточным методом, для которого вероятность выбора определенной особи в новое поколение пропорциональна ее приспособленности.

Таким образом, обучаемые особи отбираются по конечным фенотипам особей $S_{F_k} = S_{P_k}(t=T)$, т.е. по конечному результату обучения, а по наследству потомкам передаются генотипы S_{G_k} .

Поскольку потомкам передаются именно генотипы S_{G_k} , а не фенотипы, то эволюционный процесс имеет дарвиновский характер.

Дополнительно, как и в [2], учтем то, что процесс обучения имеет определенную нагрузку на особь и приспособленность особи может уменьшаться под влиянием этой нагрузки. С этой целью будем рассматривать модифицированные приспособленности особей:

$$f_{mk} = \exp(-\alpha d) \{ \exp[-\beta\rho(S_{F_k}, S_M)] + \varepsilon \}, \quad (2)$$

где α – положительный параметр, учитывающий нагрузку, связанную с обучением, $d = \rho(S_{G_k}, S_{F_k})$ – расстояние по Хеммингу между начальным и конечным фенотипом рассматриваемой особи, т.е. величина, характеризующая интенсивность всего процесса обучения особи.

Поскольку начальные генотипы особей в исходной популяции S_{G_k} случайны, то среднее расстояние по Хеммингу между этими цепочками и оптимальной S_M равно $N/2$. Такое расстояние нужно преодолеть путем обучения и эволюционного поиска.

Анализ модели был проведен путем компьютерного моделирования.

Результаты моделирования

Схема и параметры моделирования. Рассматривается два режима работы модели: 1) с обучением, как изложено выше, 2) без обучения, в этом случае обучения не происходит и считается, что $S_{P_k} = S_{G_k}$. Второй режим можно считать случаем «чистой эволюции».

При расчетах параметры модели выбираем таким образом, чтобы эволюционный поиск проходил достаточно эффективно, при этом используем опыт работы [4] для случая чистой эволюции. Приспособленности особей в [4] определялись аналогично выражению (1), только влияние случайных факторов не учитывалось (было $\varepsilon = 0$). Полагаем, что длина цепочек достаточно велика: $N = 100$. Параметр отбора считаем равным $\beta = 1$, это соответствует достаточно высокой интенсивности отбора, при которой время отбора сравнительно мало, а время эволюционного поиска определяется интенсивностью мутаций. Интенсивность мутаций должна быть не слишком высока, чтобы не было мутационных потерь уже найденных в процессе эволюции удачных особей, но и не слишком мала, для того, чтобы мутационный поиск происходил достаточно быстро. С учетом этого полагаем, что вероятность замены любого символа в одном поколении в генотипах S_{Gk} при мутациях равна $p_m = N^{-1} = 0.01$. При такой интенсивности мутаций p_m за одно поколение происходит замена примерно одного символа в генотипе особи, т.е. в течение одного поколения за счет мутаций расстояние по Хеммингу ρ между S_{Gk} и S_M изменяется в среднем на 1. Отбор приводит к уменьшению этого расстояния. Поскольку расстояние по Хеммингу от генотипов особей нулевого поколения до S_M порядка N , то весь процесс эволюции займет порядка $G_T \sim N$ поколений. Такая оценка скорости эволюции справедлива, если численность популяции n достаточно велика и нейтральным отбором особей (независящим от приспособленности особей) можно пренебречь. Для выполнения этого условия достаточно потребовать, чтобы характерное время (число поколений) нейтрального отбора (по порядку величины равное n [5]) было не меньше G_T , поэтому полагаем $n = G_T = N$.

Итак, параметры расчета в соответствии с опытом работы [4] выбираем следующим образом: $N = 100$, $\beta = 1$, $p_m = N^{-1} = 0.01$, $n = N$.

Также считаем, что $T = 2$, $\varepsilon = 10^{-6}$.

Сопоставление режимов с обучением и без обучения. Сопоставим результаты расчетов для режимов с обучением и без обучения. На рис. 1 представлена зависимость от номера поколения G среднего по популяции расстояния по Хеммингу $\rho = \rho(S_{Gk}, S_M)$ между генотипами S_{Gk} и оптимальной цепочкой S_M в начале поколения. Кривая 1 характеризует режим с обучением, кривая 2 - режим без обучения. Полученные зависимости усреднены по 1000 расчетам. Приспособленности особей определяются выражением (1). Видно, что без обучения чисто эволюционный процесс (кривая 2) не обеспечивает оптимизации генотипов, а при наличии обучения (кривая 1) явно происходит приближение к оптимальной цепочке S_M .

Чтобы разобраться, почему не происходит уменьшения ρ в процессе чистой эволюции, оценим величину приспособленности (1) в исходной популяции. Для исходной популяции все генотипы удалены от S_M , для них $\rho = \rho(S_{G_k}, S_M) = \rho(S_{F_k}, S_M) \sim N/2 = 50$, следовательно, $\exp(-\rho) \sim 10^{-22} \ll \varepsilon$. Это означает, что все особи популяции имеют приблизительно одинаковое значение приспособленности, равное ε , и, следовательно, в случае чистой эволюции вообще не происходит селекции особей. Приближение к S_M происходит только при наличии обучения.

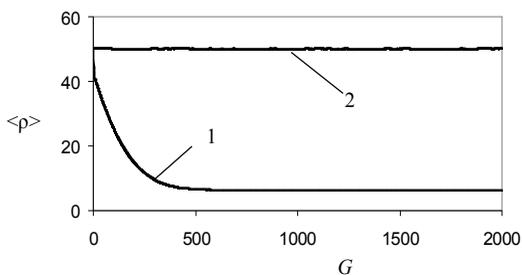


Рис. 1. Зависимость среднего по популяции расстояния до оптимума $\langle \rho \rangle = \langle \rho(S_{G_k}, S_M) \rangle$ от номера поколения G ; 1 – режим с обучением, 2 – режим чистой эволюции.

Эффект ускорения эволюционного процесса за счет обучения иллюстрируется рис. 2, на котором представлено распределение особей $n(\rho)$ по ρ в разные моменты первого поколения. Кривая 1 показывает распределение по $\rho = \rho(S_{G_k}, S_M)$ для исходных генотипов особей в начале поколения. Кривая 2 показывает распределение по $\rho = \rho(S_{F_k}, S_M)$ для особей после обучения, но еще до отбора. Кривая 3 показывает распределение по $\rho = \rho(S_{F_k}, S_M)$ для отобранных особей. Кривая 4 показывает распределение по $\rho = \rho(S_{G_k}, S_M)$ для генотипов отобранных особей в конце поколения. Генотипы отобранных особей S_{G_k} достаточно близки к фенотипам обученных и отобранных особей S_{F_k} , поэтому распределение по $\rho = \rho(S_{G_k}, S_M)$ для генотипов (кривая 4) перемещается в сторону распределения для конечных фенотипов S_{F_k} (кривая 3). В следующих поколениях происходит аналогичное дальнейшее смещение распределения $n(\rho)$ в сторону меньших значений ρ . Такое смещение характеризует механизм генетической ассимиляции.

Подчеркнем, что в результате обучения происходит смещение к достаточно малым ρ , при которых существенно различаются приспособленности (1) и происходит отбор особей с меньшими

значениями $\rho(\mathbf{S}_{F_k}, \mathbf{S}_M)$. Для того, чтобы изложенный механизм работал, обучение должно быть достаточно сильным.

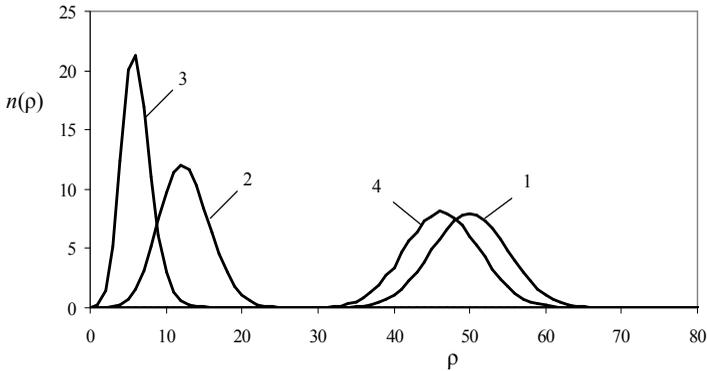


Рис. 2. Распределение особей $n(\rho)$ по величинам ρ в первом поколении эволюции: 1 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$ для исходных генотипов до обучения, 2 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{F_k}, \mathbf{S}_M)$ для особей после обучения, но еще до отбора, 3 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{F_k}, \mathbf{S}_M)$ для отобранных особей, 4 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$ для генотипов отобранных особей в конце поколения (усреднено по 10000 расчетам).

Эффект экранирования. Однако сильное обучение может не только способствовать, но и препятствовать эволюционному поиску оптимального генотипа $\mathbf{S}_{G_{opt}} = \mathbf{S}_M$. Как показывает кривая 1 на рис. 1, конечное значение $\langle \rho \rangle$ остается достаточно большим, приблизительно равным 6.2. Это связано с тем, что для сильного обучения при $G \sim 1000$ нахождение оптимального фенотипа $\mathbf{S}_{F_{opt}} = \mathbf{S}_M$ происходит независимо от генотипа \mathbf{S}_{G_k} . Поэтому при больших G не происходит приближения генотипов к \mathbf{S}_M . Наблюдается эффект экранирования [2].

Влияние нагрузки на обучение на моделируемые процессы. Был проведен анализ влияния нагрузки на обучение на моделируемые процессы эволюции с обучением. Для этого случая приспособленность определялась выражением (2). Расчет проводился для указанных выше параметров ($N = n = 100$, $\beta = 1$, $p_m = 0.01$, $T = 2$, $\varepsilon = 10^{-6}$), величина α полагалась равной 1. Результаты расчета представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 показана зависимость среднего по популяции расстояния $\langle \rho \rangle = \langle \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M) \rangle$ между генотипами \mathbf{S}_{G_k} и оптимальной цепочкой \mathbf{S}_M от номера поколения G . На рис. 4 представлена динамика распределений особей $n(\rho)$ по величинам ρ в первом поколении эволюции в разные моменты поколения.

Сравнение рис. 1,2 и рис. 3,4 показывает, что учет нагрузки на обучение приводит к дополнительному значительному ускорению эволюции. При учете нагрузки на обучение в конце эволюционного процесса (при $G = 200$) оптимальные фенотипы и генотипы находятся. Эффект экранирования в этом случае отсутствует.

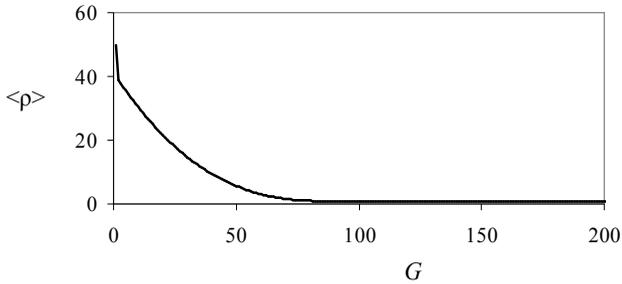


Рис. 3. Зависимость среднего по популяции расстояния до оптимума $\langle \rho \rangle$ для генотипов особей от номера поколения G с учетом нагрузки на обучение; приспособленность особей определяется выражением (2) (усреднено по 1000 расчетам).

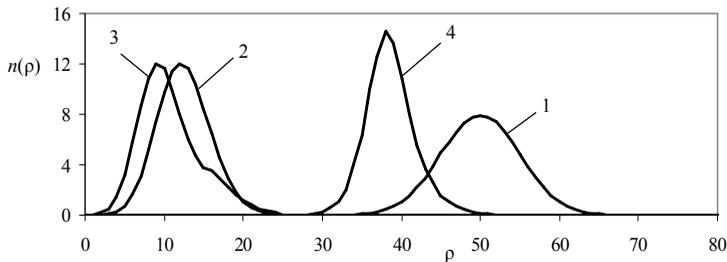


Рис. 4. Распределение особей $n(\rho)$ по величинам ρ в первом поколении эволюции с учетом нагрузки на обучение. 1 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_M)$ для исходных генотипов до обучения, 2 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Ek}, \mathbf{S}_M)$ для особей после обучения, но еще до отбора, 3 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Ek}, \mathbf{S}_M)$ для отобранных особей, 4 – распределение по $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_M)$ для генотипов отобранных особей в конце поколения. Смещение распределения 4 к меньшим значениям ρ существенно больше, чем на рис. 2 (усреднено по 10000 расчетам).

Дополнительно была построена специальная модель для сопоставления с подходом Хинтона и Новлана [1] и показано, что в

рамках использования этого подхода с использованием модели квазивидов [3] наблюдаются близкие к изложенным механизмы взаимодействия между обучением и эволюцией.

Заключение

Таким образом, построена и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюционной оптимизацией. Детально изучен механизм генетической ассимиляции приобретаемых навыков в течение ряда поколений эволюционного процесса. Показано, что генетическая ассимиляция происходит за счет того, что при обучении фенотипы особей смещаются в сторону оптимальной цепочки, а в дальнейшем при отборе (в соответствии с конечными фенотипами) выбираются те особи, генотипы которых также приближаются к оптимальной цепочке.

Изучен эффект экранирования, который приводит к тому, что сильное обучение тормозит эволюционный поиск оптимального генотипа, если оно увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа особи.

Проанализировано влияние нагрузки на обучение на исследованные процессы. Нагрузка на обучение приводит к уменьшению приспособленности особей таким образом, что это уменьшение тем больше, чем больше было изменение фенотипа в процессе обучения. Показано, что наличие нагрузки на обучение приводит к усилению генетической ассимиляции и к дополнительному значительному ускорению эволюционного поиска.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-01-00399).

Список литературы

1. *Hinton G.E., Nowlan S.J.* How learning can guide evolution // *Complex Systems*. 1987. V. 1. P. 495-502.
2. *Mayley G.* Guiding or hiding: Explorations into the effects of learning on the rate of evolution // In: *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life (ECAL 97)*. Eds. Husbands P. and Harvey I. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 1997. P. 135-144.
3. *Эйген М.* Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973.
4. *Редько В.Г., Цой Ю.Р.* Оценка эффективности эволюционных алгоритмов // Доклады АН. 2005. Т. 404. № 3. С. 312-315.
5. *Кимура М.* Молекулярная эволюция: теория нейтральности. М.: Мир, 1985.