

Раздел I. Системы искусственного интеллекта

А.С. Сигов, Е.С. Анцыферов, Б.И. Голубь, С.В. Ширяев

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

В настоящее время в диагностике и лечении сложных заболеваний все большую актуальность приобретает направление, ориентированное на выявление причинно-следственных связей в организме. Согласно этому направлению организм рассматривается как некоторая сложно организованная система, состоящая из множества взаимосвязанных подсистем [1]. При этом каждая из подсистем несет свою часть “ответственности” за состояние организма. Такому направлению отвечает разработка новых методов и средств диагностики и лечения, в частности широкого класса автоматизированных информационно-распознающих систем (АИРС) [2-11], функционирующих в условиях значительной априорной неопределенности и обеспечивающих тем самым возможность приобретения новых знаний о связях между параметрами физических полей исследуемых объектов и их состояниями. Увеличение количества методов и средств диагностики и лечения, широкое применение динамических исследований приводит к тому, что диагностика и лечение становятся необычайно сложными технологическими процессами, требующими четкого управления. При этом требуемое качество процессов диагностики и лечения определяется наборами стратегий, которыми располагает эксперт, принимающий решения. В таком случае речь идет не о качестве диагностики и лечения в общем, статистическом смысле, а о стратегической точности диагноза, когда каждому диагнозу ставится в соответствие одно единственное решение. Вместе с тем до сих пор главным управляющим звеном процесса диагностики является специалист и именно на него ложится нелегкая процедура принятия правильных решений. Поэтому для обеспечения высокого качества результатов, рациональной организации и облегчения работы специалистов целесообразно использование «интеллектуализированных» (экспертных) систем поддержки принятия решений (ЭС), что предполагает, в свою очередь, формализацию процессов управления качеством диагностики и лечения. Наборы стратегий предполагают использование огромного числа управляющих воздействий на процессы диагностики и лечения, что требует разработки методик экспертного управления качеством данных процессов с использованием автоматизированных систем комплексного управления, построенных на основе совместного применения АИРС и ЭС, сочетающего их основные преимущества.

В этой связи важным является поиск оптимального соотношения между содержательным и формальным аспектами задачи. Действительно, при построении АИРС достигается предельная степень абстрагирования от содержательного аспекта знаний, которыми способен владеть лишь высококвалифицированный специалист, с одновременным эффективным решением важной задачи приобретения знаний о связях свойств анализируемых физических полей с состояниями исследуемых объектов. При построении же ЭС, необходимых для управления качеством, следует стремиться к построению таких формальных моделей, которые, обеспечивая возможность представления знаний в ЭС, минимизировали бы неизбежную потерю смыслового содержания процессов диагностики и лечения. При этом очевидно, что для более содержательного смыслового аспекта базы знаний

требуется, как правило, более простой и логически понятный механизм формализации процессов управления.

Все множество управляющих воздействий, необходимых для постановки диагноза, обозначим через U . Каждое управляющее воздействие может принимать некоторый континуум допустимых значений. В таком случае задачу управления диагностикой можно сформулировать как выбор из заданного допустимого множества значений управляющих воздействий таких, при которых достигается максимум заданной целевой функции. Вместе с тем, специфика медицинской диагностики состоит в том, что в каждом конкретном случае для получения “наилучшей” совокупности измеряемых диагностических параметров необходимо выбирать адекватно “наилучшую” совокупность управляющих воздействий. Реально добиться такой адекватности, особенно в условиях априорной неопределенности, практически невозможно. Поэтому речь должна идти об определении закона, по которому должны выбираться управляющие воздействия для каждого конкретного вида заболевания. Определение закона связано, как правило, с проведением большого числа измерительных экспериментов. В этом плане медицинская диагностика предоставляет довольно ограниченные возможности. Поэтому приходится пользоваться прежде всего такими исходными данными как число управляющих воздействий и допустимый интервал значений каждого из них.

Тип целевой функции определим как минимум средних потерь или вероятности ошибочных решений (максимум достоверности или качества диагностики). Это соответствует байесовскому принципу оптимизации, принятому при построении АИРС, где основным критерием является апостериорная плотность вероятности правильных решений или принадлежности текущих траекторий векторов измеренных диагностических параметров к установленному образу (виду заболевания). Для определения аналитического вида закона выбора управляющих воздействий $P(U)$ используем принцип максимума энтропии, согласно которому при неизвестной плотности распределения случайной величины следует выбирать плотность, обеспечивающую максимизацию энтропии при учете всех известных ограничений. Итак, энтропия плотности распределения

$$H = - \int_U P(U) \ln P(U) dU ,$$

ограничения

$$\int_U P(U) dU = 1 ,$$

$$\int_U b_k(U) P(U) d(U) = \alpha_k , \quad k = 1, 2, \dots, K$$

где $b_k(U)$ – известные непрерывно дифференцируемые функции ограничений;

α_k – заданные действительные числа, так называемые константы ограничений.

Используя известный в математическом программировании метод множителей Лагранжа, получаем

$$H_1 = - \int_U P(U) \left[\ln P(U) - \sum_k \lambda_k b_k(U) \right] dU - \sum_k \lambda_k \alpha_k ,$$

где $\alpha_0 = 1$ и $b_0(U) = 1$ для всех U .

Взяв частные производные от функции H_1 по плотности распределения $P(U)$, будем иметь

$$\frac{\partial H_1}{\partial P(U)} = - \int_U \left\{ \left[\ln P(U) - \sum_k \lambda_k b_k(U) \right] + 1 \right\} dU .$$

Приравнивая правую часть данного соотношения нулю, придем к следующему соотношению:

$$P(U) = \exp \left[\sum_k \lambda_k b_k(U) - 1 \right].$$

Полученное соотношение принадлежит к целому семейству плотностей распределения, интегрируемых в пространстве управлений. Так, если $U_{\min} < U < U_{\max}$, то

$$P(U) = \exp(\lambda_0 - 1).$$

Поскольку

$$\int_{U_{\min}}^{U_{\max}} \exp(\lambda_0 - 1) dU = 1,$$

то

$$\exp(\lambda_0 - 1) = \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}},$$

а

$$P(U) = \begin{cases} \frac{1}{U_{\max} - U_{\min}}, & U_{\min} < U < U_{\max} \\ 0, & U_{\min} > U > U_{\max} \end{cases}.$$

То есть для U , отличных от нуля в некотором конечном интервале, распределение $P(U)$ принимает вид равномерного. К этому же семейству принадлежит бета-распределение. Путем вариации параметров этого распределения можно получить целый ряд важных с практической точки зрения распределений.

Таким образом, эксперимент по определению оптимального закона выбора значений управляющих воздействий состоит в выполнении следующих операций: установление определенных, в общем случае произвольных параметров бета-распределения; генерация для каждого диагностируемого объекта псевдослучайной последовательности (например, методом Монте-Карло) значений управляющих воздействия с последующим определением меры принадлежности к данному виду заболевания; оценка достоверности полученных результатов по обучающей выборке измеряемых диагностических параметров; коррекция параметров бета-распределения при неудовлетворительной достоверности; использование установленных экспериментально параметров бета-распределения при диагностике данного вида заболевания.

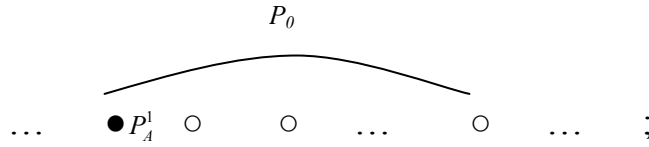
При наличии априорной информации о диапазонах изменения значений диагностических параметров в пределах исследуемого заболевания (получение такой информации вполне реально), проведение многократных обследований одних и тех же пациентов заменяется на генерацию псевдослучайных значений этих параметров по установленному закону распределения.

Предложенная методика управления качеством диагностики проходит апробацию в ОНЦ РАМН им. Н.Н. Блохина при диагностике сложных заболеваний молочной железы путем сочетания различных методов (термографии, радиоизотопы, маммография и др.). Результаты предварительных испытаний показали, что при сохранении необходимого уровня достоверности существенно снижается нагрузка на специалиста, управляющего диагностикой.

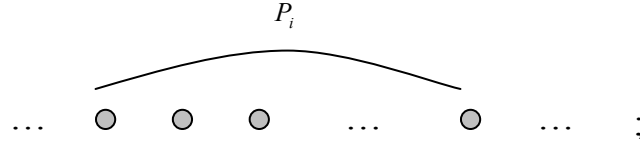
Процесс лечения будем представлять в виде чередующейся смены конечного числа состояний заболевания. При этом переходы из одного состояния в другое при лечении сложных заболеваний носят чаще всего вероятностный характер. В процессе лечения заболевание под влиянием управляющих воздействий должно пройти через несколько состояний и достигнуть одного из них, в котором вероят-

ность его наличия окажется ниже некоторого порога значимости. Представим этот процесс в следующем виде:

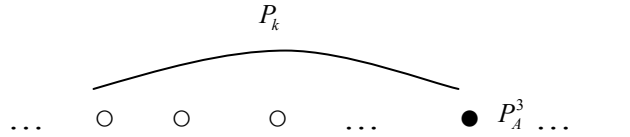
1) начальное распределение состояний, характеризующееся вектором вероятности P_0 и априорной вероятностью заболевания $P_A^{(1)} \geq P_{nop}^{(1)}$:



2) промежуточное распределение возможных состояний, достигнутое в i -й момент времени в результате лечебных воздействий и характеризующееся вектором P_i :



3) конечное распределение состояний, характеризующееся вектором вероятности P_k и апостериорной вероятностью заболевания $P_A^{(3)} \leq P_{nop}^{(3)}$:



Аппроксимируем процесс управления лечением марковским вероятностным процессом с конечным числом состояний. Такой процесс описывается линейным векторно-матричным уравнением относительно вектора вероятностей различных состояний

$$P_{i+1} = B_i P_i, \quad (1)$$

где B_i – матрица вероятностей переходов, зависящая от дискретного времени i , стадии заболевания, функционального состояния организма и выбранного способа лечебного воздействия в данный момент. Матрица B_i в ходе управления лечением может принимать одно из m значений: B_1, B_2, \dots, B_m . Путем выбора последовательности матриц из возможного их множества необходимо обеспечить максимум критерия качества

$$J = (d, P_k), \quad (2)$$

означающего вероятность одного из состояний на k -м шаге (d – целевой вектор, указывающий на конечное состояние). Согласно (1), для последовательных моментов времени будем иметь

$$P_1 = B_0 P_0; P_2 = B_1 P_1; \dots; P_k = B_{k-1} P_{k-1}.$$

Отсюда

$$P_k = B_{k-1} B_{k-2} \dots B_1 B_0 P_0. \quad (3)$$

Последнее соотношение определяет алгоритм управления качеством. Максимум критерия качества

$$F_0(P_0) = \text{MAX}(d, B_{k-1} \dots B_0 P_0). \quad (4)$$

Чтобы найти оптимальную совокупность B_0, \dots, B_{k-1} , необходимо предварительно определить все значения критерия J и выбрать из них максимальное. Число таких вычислений равно m^k . Для сокращения объема вычислений обычно используется метод динамического программирования. Согласно этому методу в рассмотрение вводится серия промежуточных критериев

$$F_i(P_i) = \text{MAX}(d, B_{k-1} \dots B_i P_i). \quad (5)$$

Тогда, согласно принципу Беллмана,

$$F_i(P_i) = \text{MAX}_{B_i} F_{i+1}(P_{i+1}) = \text{MAX}_{B_i} F_{i+1}(B_i P_i). \quad (6)$$

Производя оптимизацию последовательно в обратном времени, получим

$$F_{k-1}(P_{k-1}) = \text{MAX}_{B_{k-1}}(B_{k-1} P_{k-1});$$

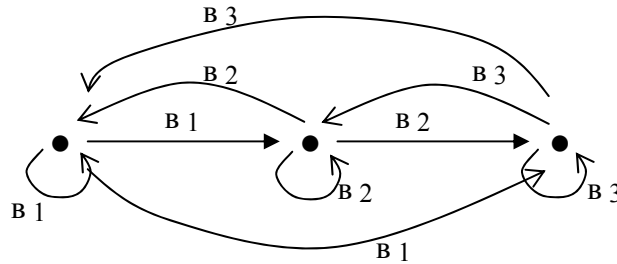
$$F_{k-2}(P_{k-2}) = \text{MAX}_{B_{k-2}}(B_{k-2} P_{k-2});$$

.....

Итак, исходная k -шаговая задача сводится к последовательности одношаговых задач. Вместе с тем, чтобы выполнить одношаговую оптимизацию на $(k-1)$ -м шаге, требуется иметь значения вектора P_{k-1} . Но эти значения, как правило, неизвестны. Поэтому необходимо провести предварительное табулирование всех возможных (предполагаемых) значений этого вектора.

Таким образом, для управления качеством лечения, согласно рассмотренной методике, необходимо иметь: таблицы предполагаемых значений векторов состояний; набор матриц вероятностей переходов из одного состояния в другое; возможное число состояний. Отметим, что получение такой информации требует тщательной, кропотливой работы экспертов, обладающих высоким уровнем знаний в данной области.

Предложенная методика апробируется в ОНЦ РАМН им. Н.Н. Блохина при управлении качеством лечения злокачественных образований молочной железы. Например, при использовании интенсивной терапии (химия и облучение) были выделены три существенных состояния: исходное, промежуточное и конечное. Для управления лечением пациентки с 3-й стадией заболевания были разработаны две вероятностные матрицы, учитывающие все возможные переходы между состояниями, т.е. адекватные следующей диаграмме:



$$B = \begin{vmatrix} B_1 & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{vmatrix} \quad B_1 = \begin{vmatrix} 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{vmatrix} \quad B_2 = \begin{vmatrix} 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0.2 & 0.1 & 0.7 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{vmatrix}.$$

В качестве начального распределения было принято $P_0 = (1, 0, 0)$.

Для целевого вектора было принято $d = (0, 0, 1)$.

Число шагов $\kappa = 2$. Число возможных вариантов равно $2^2 = 4$:

$$(d, B_1 B_1 P_0), \quad (d, B_1 B_2 P_0), \quad (d, B_2 B_1 P_0) \text{ и } (d, B_2 B_2 P_0).$$

Результаты вычисления значений векторов промежуточных состояний

$$B_1 P_0 = (0.2; 0.7; 0.1);$$

$$B_2 P_0 = (0.1; 0.5; 0.4).$$

Компоненты векторов, соответствующие конечному состоянию, приняли следующие значения:

$$(B_1 B_1 P_0) = 0.52; \quad (B_1 B_2 P_0) = 0.63;$$

$$(B_2 B_1 P_0) = 0.56; \quad (B_2 B_2 P_0) = 0.67.$$

Согласно полученному, оптимальное воздействие состоит в двукратном использовании матрицы B_2 , т.е. определенным образом дозированного облучения. В результате применение предложенной методики обеспечило повышение качества лечения.

Достижение высокой эффективности управления связывается в настоящее время с использованием экспертных систем (ЭС) как неотъемлемого составного элемента практически любой системы автоматизированного управления сложными технологическими процессами. Предложенные в данной работе формализованные методики управления качеством процессов диагностики и лечения сложных заболеваний позволяют пополнять базы знаний экспертных систем о вероятностных законах выбора управляющих воздействий и их параметрах. Результаты предварительных испытаний показали, что при сохранении необходимого уровня достоверности предложенные методики позволяют существенно снизить нагрузку на специалистов, управляющих качеством процессов диагностики и лечения. Разработанные методики создают хорошие предпосылки для создания автоматизированных систем комплексного управления качеством, построенных на основе совместного использования АИРС и ЭС и сочетающих их основные преимущества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Судаков К.В.* Теория функциональных систем М.: Наука, 1996.
2. *Куртев Н.Д., Анцыферов С.С.* Структурно-стохастический метод обработки и распознавания информации тепловых изображений. // Оптический журнал, 1997, т.64, №2, с. 35-37.
3. *Kurtev N.D., Antsyferov S.S.* Structural-stochastic method of processing and recording information in thermal images. // J. Opt. Technol., 1997, v. 64 (2), p.102-104.
4. *Анцыферов С.С.* Формирование спектра тепловых изображений объектов и распознавание их образов. // Оптический журнал, 1999, т. 66, №12, с. 44-48.
5. *Antsyferov S.S.* Forming the spectrum of thermal images of objects and recognizing their patterns. // J. Opt. Technol., 1999, v. 66 (12), p. 1047– 1049.
6. *Анцыферов С.С., Голубь Б.И.* Принципы проектирования адаптивных широкоспектральных информационно-распознающих тепловизионных систем. // Сб.: «Тепловидение» / Под ред. А.С. Сигова, М.: МИРЭА, 2000, №13, с. 3-26.
7. *Евтихийев Н.Н., Анцыферов С.С., Голубь Б.И.* Адаптация информационно-распознающих биомедицинских систем. // Биомедицинская радиоэлектроника, 2001, № 1, с. 5-9.
8. *Колесов С.Н., Анцыферов С.С., Голубь Б.И., Ширяев С.В.* Построение медицинских систем распознавания тепловизионных образов. // Биомедицинская радиоэлектроника, 2001, № 1, с. 36-38.
9. *Евтихийев Н.Н., Анцыферов С.С., Голубь Б.И.* Технология адаптивной обработки информации тепловых широкоспектральных полей. // Научные технологии, 2002, т.3, №4, с.45-50.
10. *Анцыферов С.С.* Метрология виртуальных систем. // Измерительная техника, № 5, 2003, с. 17-21.
11. *Евтихийев Н.Н., Анцыферов С.С.* Методология оценки состояний организма по физическим полям. // Доклады 5-й Международной конференции "Радиоэлектроника в медицине", М.: ИРЭ РАН, 2003, с.3-5.