УДК 687.157.017

БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ КАК ОБЪЕКТ СУБЪЕКТИВНОГО АНАЛИЗА

В.А. Касьянов
Доктор технических наук, профессор*
Контактный тел.: 050-700-79-04
E-mail: vakasyanov@mail.ru
К. Шафран
Кандидат технических наук*
Т.В. Шипитяк
Аспирантка*
Контактный тел.: 097-688-87-52
E-mail: tanya_perzhinska@ukr.net
*Кафедра механики
Национальный авиационный университет
пр. Комарова, 1, г. Киев, 03680

Запропоновано альтернативний підхід щодо дослідження безпеки польотів, а саме «людського фактору». Підхід базується на принципі максимуму ентропії. Наведені деякі результати моделювання

Ключові слова: льотна ситуація, суб'єктивний аналіз, суб'єктивна ентропія та інформація

Предложен альтернативный подход к исследованию безопасности полетов, а именно «человеческого фактора». Подход основан на принципе максимума энтропии. Приведены некоторые результаты моделирования

Ключевые слова: полетная ситуация, субъективный анализ, субъективная энтропия и информация

The alternative approach to the flight safety investigation, in particular "human factor", is offered. An approach is based on entropy maximum principle. Some results of modeling are presented

Keywords: flying situation, subjective analysis, subjective entropy and information

Постановка проблемы

В настоящей работе рассматривается проблема определения количественных оценок роли человеческого фактора. При этом изучаются случаи многоальтернативных ситуаций, когда пилот вынужден осуществлять выбор в условиях существенной неопределенности.

Получение статистических оценок в области безопасности полетов сопряжено с необходимостью ответить на два важных вопроса: 1. Для чего нужны такие оценки, и при каких условиях они могут использоваться – на уровне авиакомпаний или на уровне государства; с какой целью – для диагностики, определения динамики уровней безопасности, регулирования ресурсов, направленных на поддержание и повышение этих уровней, принятия стратегических и оперативных решений в части закупки авиационной техники, средств обеспечения полетов, подготовки персонала и т.д. – в целом для выработки управленческих решений. 2. Какими свойствами обладают эти оценки, можно ли к их получению и анализу применять стандартные, хорошо разработанные методы математической статистики, или нужны другие подходы?

Летательный аппарат вместе с экипажем рассматривается как активная система, взаимодействующая со внешней средой, в качестве главного элемента выступает человек, принимающий решения. То обстоятельство, что воздушные судна последней генерации все более и более автоматизированы и, в принципе, могут совершать рейсы без вмешательств пилота, отнюдь не снимает проблему «человеческого фактора», а, следовательно, воздушное судно с экипажем не превращается в пассивную систему. Можно привести множество примеров из недавнего прошлого, когда неправильно принятые решения приводили к тяжелым последствиям – авариям и катастрофам.

Метод исследования, который используется ниже, можно назвать «информационно-энтропийным». Это вполне соответствует современной тенденции информатизации как всей жизни, так и отдельных производственных процессов.

Анализ последних исследований и публикаций

Роли «человеческого фактора» в авиации посвящено большое число публикаций, например: [1-5]. Квинтэссенция последних достижений анализа и регулирования безопасности сосредоточена в документации ICAO: [6,7,8,9]. Проблема безопасности полетов становится все более актуальной в связи с ростом объема авиаперевозок. Поэтому требуется развитие новых альтернативных подходов к исследованию безопасности, в частности, роли человеческого фактора.

Цель статьи

Целью данной статьи является изложение альтернативного подхода к исследованию задач безопасности полетов и учета роли человеческого фактора.

Основные аспекты проблемы

Статистические методы и теоретические трудности их применения

Показатели безопасности полетов, предлагаемые ICAO и в национальных нормах годности государств [1,2], определенны как статистические оценки.

Предполагается, что они могут быть использованы для: 1. Нормирования уровней безопасности; 2. Определения соответствия ожидаемых уровней для новых образцов авиационной техники нормированием; 3. Для решения задач управления безопасностью.

В рамках более широкой задачи оптимизации функционирования авиационной транспортной системы (если такая задача в явном виде сформирована) показатели безопасности используются для формирования изопериметрических условий.

В [1] приводятся, например, такие показатели:

- число катастроф n_k на 10^8 км полета:
$I_1 = L_\Sigma^{-1} \cdot n_k \cdot 10^8$
- число катастроф n_k на 10^5 часов полета:
$I_2 = T_\Sigma^{-1} \cdot n_k \cdot 10^5$
- число катастроф n_k на 10^5 посадок:
$I_3 = N_\Sigma^{-1} \cdot n_k \cdot 10^5$
- число погибших пассажиров на 10^8 пас.-км:
$I_4 = A_m^{-1} \cdot m \cdot 10^8$

Здесь $L_\Sigma, T_\Sigma, N_\Sigma, A_\Sigma$ - соответствующие реализованные величины. По данным ICAO показатели I_1, I_2, I_3 - сильно коррелированны: $\rho_{12} = 0.77$, $\rho_{13} = 0.88$, $\rho_{23} = 0.97$, где ρ_{ij} - коэффициент корреляции.

Согласно [1], Массачусеттским технологическим институтом предложена в качестве показателя безопасности полетов, так называемая, Q-статистика:

$$Q = N^{-1} \cdot \sum_i V_i, \qquad (1)$$

где V_i - коэффициент выживания в i-ой катастрофе; N – количество полетов; n_i - количество пассажиров, а $n_{L,i}$ - количество погибших; $V_i = n_i^{-1} \cdot m_{L_i}$. По данным США этот показатель в 1937-1996 годах равен $1{,}43 \cdot 10^{-7}$. Относительная интенсивность авиационных происшествий:

$$\Lambda = \lambda \cdot I^{-1}, \qquad (2)$$

где λ – интенсивность авиационных происшествий, $I = N \cdot T_\Sigma \cdot \tau^{-2} \cdot k^{-2}$, N – число полетов за период τ, k – число самолетов данного типа, T_Σ - суммарный налет.

Использование этих и других показателей безопасности полетов, для которых устанавливаются некоторые предельные пороги, сопряжено с двумя принципиальными трудностями:

1. Чрезвычайно ограниченный объем выборки. Так, например, для того, чтобы надежно (с приемлемым доверительным интервалом) оценить показатель I, необходимо, чтобы число событий n_k было при нормируемой величине $I \le 10^{-7}$, т.е. хотя бы $n_k = 10^8$, что естественно невозможно.

2. Вторая трудность состоит в том, что, ели бы даже выборку такого объема удалось получить (это означало бы, что весь парк создается только для того, чтобы оценить уровень безопасности), то эта статистика оказывается существенно неоднородной как по условиям полета, состояниям отдельных судов, так и по причинам происшествий (отказы техники, воздействие внешней среды, ошибки пилотов, диспетчеров и т.д.)

В этих условиях, очевидно, что статистика катастроф является в основном дискриптивной. К ней не могут быть применены регулярные методы прикладной статистики, а полученные выводы могут быть лишь использованы на самых высоких уровнях иерархии системы управления для принятия качественных и количественных решений в части безопасности, например, выделении ресурсов, кадровых решений и.т.п.

Детальное управление в этих условиях сводится к реакции на каждое отдельное происшествие с соответствующим анализом и выводами.

Один из выходов состоит в том, чтобы дополнить реальное функционирование авиационной системы, или отдельной авиакомпании математическим моделированием в широком объеме возникающих условий (с учетом надежности техники, влияния человеческого фактора, воздействия внешней среды) с возможностью выхода на критические и закритические уровни, определяющих параметров.

Возникают две задачи:

1.Построения достаточно адекватной математической модели;

2. Построения оптимального сращивания модели (объемов моделирования) с данными реальной выборки.

Первая задача может быть удовлетворительно решена сравнением интегральных результатов моделирования с данными дискрептивной статистики. Есть еще один путь, состоящий в том, что формируются такие правдоподобные априорные принципы, справедливость которых подтверждается в других областях и на основе этих принципов разрабатываются методы управления безопасностью полетов.

В настоящей работе такой принцип предлагается для анализа той части общей проблемы безопасности полетов, которая связана с ролью человеческого фактора.

Вернемся к вопросу о сокращении потребного объема выборок и кратко опишем некоторые методы в связи с этим. Речь идет в первую очередь о методах взвешенного моделирования [10-13]: метод выделения главной части при интегрировании, метод снижения порядка, метод распределенной выборки [10], которые обеспечивают снижение дисперсии.

Метод существенной выборки развит в работе акад. Коваленко И.Н. и его сотрудников. Для получения статистических оценок характеристик высоконадежных систем (оценки вероятностей $\sim 10^{-7}$) с приемлемым доверительным интервалом требуются сотни миллиардов испытаний. Вероятность P того, что высоконадежная система достигнет определенного (катастрофического) состояния не более чем в m случаях при числе однородных испытаний n равна:

$$P(m \le nq) = \sum_{i=0}^{n \cdot q} \binom{n}{i} \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i}, \qquad (3)$$

где $q = 1 - p$.

Для того, чтобы получить оценку вероятности $p = 10^{-9}$ на уровне доверия 90%, необходимое число испытаний $n^{\text{потр.}} \ge 272070389496$.

Существуют программные пакеты статистического моделирования высоконадежных систем, например, HARP (Hybrid Automated Reliability Predictor), оценка надежности NASA и др.

В методе существенной выборки для генерации выборки Монте Карло используется новое распределение, обеспечивающее появление соответствующих событий с большей частотой. Пусть требуется оценить интеграл:

$$I = \int f(x) \cdot p(x) \cdot dx \,, \tag{4}$$

где $p(x)$ - плотность распределения переменной x. Несмещенная оценка есть:

$$\hat{I}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} f(x_i) \cdot \frac{P(x_i)}{q(x_i)} \,, \tag{5}$$

а выборка $\{x_i\}$ генерируется в соответствии с распределением $q(x)$.

Эта оценка также несмещенная и $E(\hat{I}_0) = E(\hat{I}_1)$, то есть сохраняется математическое ожидание. Дисперсия оценки равна:

$$D(\hat{I}_1) = \left[\int \left| f(x) \right| \cdot p(x) \cdot (x)^2 \right] - I^2 \tag{6}$$

и достигается для плотности:

$$q_0(x) = \frac{\left| f(x) \right| \cdot p(x)}{\int \left| f(x) \right| \cdot p(x) \cdot dx} \tag{7}$$

Если $|f(x)| = f(x)$ иматематическоеожидание $E(f(x))$ заранее известно, то $D(\hat{I}_1) = 0$. Замена неизвестного матожидания, какой-либо его априорной оценкой, позволяет уменьшить дисперсию оценки по выборке $\{x_i\}$.

В задачах оценки показателей безопасности применялись методы бутстрепа и перевыборки, предложенные Барзиловичем, Зубковым и др. [10], а также Беляевым [14].

Другие направления уменьшения потребного объема выборки, как при натурном, так и при компьютерном моделировании основаны на применении методов оптимального планирования эксперимента. В работе [15] развит интерполяционный метод статистического моделирования. Его применение к моделированию полета реализовано в работе [2]. Метод оказывается тем эффективнее, чем большее количество параметров оценивается одновременно. В некоторых случаях потребное число реализаций снижается в 10^3 раз и более.

3. Модель полетной ситуации

Документы по безопасности полетов оперируют понятием полетной ситуации, как правило, на вербальном уровне. Введение количественных методов анализа требует придания этому понятию определенных количественных очертаний. Определим полетную ситуацию следующим образом. Пусть фазовый вектор динамической системы есть x и в некоторый момент он имеет значение x_0. Совокупность $\{t_0, x_0\}$ определяется в теории систем как событие. Если управляемая система не более чем за время τ должна быть приведена в терминальное множество $W < R_n$, при условии, что при этом должны выполняться фазовые ограничения $x(t) \in X \subset R_n$ и ограничения на управляющие переменные $u \in U \subset R_m$. (R_n и R_m - эвклидовы пространства размерностей n и m), то условия разрешимости полетной ситуации дополняется условием $r^p < r^d$, где r^d - располагаемые ресурсы и r^p - потребные ресурсы. Задача разрешения полетной ситуации сводится либо к задаче управляемости, либо к задаче достижимости.

Сделаем три дополнительных замечания.

1. Ввиду стохастического характера всей задачи формирование полетной ситуации как количественного объекта должно производиться в вероятностных терминах. В частности, речь идет о вероятности успешного разрешения полетной ситуации.

2. В формулировку полетной ситуации входят множества W, U, X..., они в общем случае могут изменяться в процессе разрешения ситуации, т.е. являться динамическими объектами, а «полетная ситуация» - сложной динамической «переменной». Движение системы следует рассматривать как движение «изображающей» точки в пространстве полетных ситуаций, в связи, с чем возникает задача изучения динамики множеств, с использованием понятия расстояния между множествами, дифференцирования множеств. Существует ряд определений расстояний между множествами: Михалонобиса, Манхетенское, расстояние Минковского и др.

3. Поскольку рассматриваемая система является активной [16] и, соответственно в системе присутствует человек–субъект системы, описание полетной ситуации включает величины, которые характеризуют состояние систем: его мгновенное состояние, его физиологические и психические ограничения, его пассивные и активные ресурсы. В частности, в состав факторов определяющих полетную ситуацию входят: множество альтернатив $\sigma_i \in S_a$, распределение предпочтений $\pi(\sigma_i, t)$, пороги так называемой субъективной энтропии.

4. Принципы и допущения субъективного анализа. Субъективная энтропия и субъективная информация

Поскольку подавляющая часть тяжелых авиационных происшествий (катастроф и аварий) обусловлена так называемым «человеческим фактором», развитие количественных методов анализа в этой области представляется весьма актуальной задачей. Применение методов прикладной статистики, как уже было сказано, сталкивается с серьезными теоретическими (и даже практическими) трудностями. Они многократно возрастают, когда применяются в контексте «человеческого фактора».

В последние годы появился новый подход к этой проблеме, основанный на использовании методов «субъективного анализа» [25]. Недостаток статистики восполняется постулированием определенных правдоподобных принципов и системы допущений.

В отличие от работ предыдущего подхода, когда пилот (в штурвальном режиме) в модели описывается как звено в системе управления, в виде передаточных функций [17, 18], либо как в работе [19] модель деятельности пилота получается из предположения, что пилот минимизирует некоторый квадратичный функционал. (Обзор достижений в области динамических моделей пилота представлен в [20]).

В данном случае мы сосредоточим внимание на тех примерах, когда пилот вынужден решать задачу выбора на множестве альтернатив и по мере увеличения степени автоматизации управления полетом, относительная доля таких ситуаций будет возрастать. Свяжем выбор решения с распределением предпочтений на некотором множестве альтернатив: $\sigma_i \in S_a$, $(i \in \overline{1,N})$.

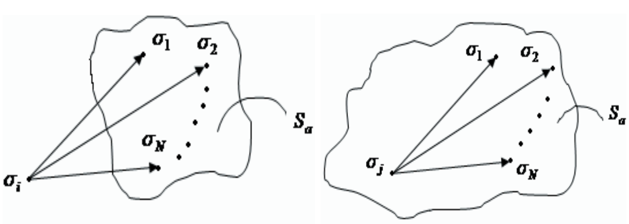
Первый постулат состоит в том, что распределение предпочтений на S_a, как и само множество, S_a каждый раз имеет «индивидуального носителя», иными словами, является прерогативой субъекта системы. Нельзя представить себе, что существует какое-либо другое вместилище предпочтений, обособленное от субъекта системы.

Можно говорить о безусловных и условных предпочтениях. Количественную меру сравнительной «силы» предпочтения будем обозначать через $\pi(\sigma_i)$, $\pi(\sigma_i|\sigma_j)$ и называть предметными предпочтениями, если речь идет о выборе товара из некоторого множества, или стратегии управления при разрешении полетной ситуации. Распределения $\pi(\sigma_i)$, $\pi(\sigma_i|\sigma_j)$ во многом подобны распределениям вероятностей, но таковыми не являются. Отличия возникают на аксиоматическом уровне.

Будем считать, что показатели предпочтений нормированы:

$$\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i)=1;\ \sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i|\sigma_j)=1;\ \forall i \in \overline{1,N} \tag{8}$$

Возможны два случая: «точка зрения субъекта» находится вне множества S_a (рис. 1-а), либо внутри S_a (рис. 1-б).



а) б)

Рис. 1. а) Субъект находится вне множества S_a; б) Субъект находится внутри множества S_a

Под проблемой $\square(\sigma_i \to \sigma_j)$ будем подразумевать упорядоченную пару (σ_i,σ_j) или бинарное отношение: $\sigma_i\rho\sigma_j$. Алгебра альтернатив и алгебра проблем сводится с некоторыми оговорками к теории бинарных отношений. «Цель» определяется как результат выбора на множестве $\square$: ($\sigma_i\rho\sigma_j$).

Количественная теория предпочтений становится содержательной, если удается построить количественный образ предпочтений. Эта задача решается постулированием следующего принципа: каждый раз распределение предпочтений максимизирует некоторый критерий, априорно «заложенный» в человеческую психику.

Здесь мы напомним точку зрения Эйлера: «Во всем, что нас окружает, виден смысл какого-либо максимума или минимума». С точки зрения рассматриваемой здесь задачи мы могли бы дополнить это утверждение: не только то «что нас окружает», но и то, что «внутри нас», в том числе, в законах функционирования психики.

Принцип, который мы априорно «навязываем» человеческой психике назовем «принципом максимума субъективной энтропии». Под субъективной энтропией подразумевается величина:

$$H_\pi = -\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i)\cdot\ln\pi(\sigma_i)\quad H_\pi \ge 0 \tag{9}$$

(выбор основания логарифма не имеет принципиального значения). Для распределения $\pi(\sigma_i|\sigma_j)$:

$$H_{\pi_j} = -\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i|\sigma_j)\cdot\ln\pi(\sigma_i|\sigma_j)\quad H_{\pi_j} \ge 0 \tag{10}$$

Энтропия H_π, (H_{π_j}) представляет собой показатель неопределенности. Если $\pi_i = \frac{1}{N}$ $(\forall i \in \overline{1,N})$, т.е. имеет место максимальная неопределенность $H_\pi = H_{\pi\max} = \ln N$ и, наоборот, если распределение π_i сингулярно ($\pi_i = 0$ $\forall i \ne j$ и $\pi_j = 1$, если $i = j$), то $H_\pi = 0$.

Выбор H_π в качестве показателя неопределенности, связан с определением возможных морфизмов в S_a [21] и может быть обоснован в рамках теории категорий.

Предположим, что эффективность системы описывается функцией:

$$E_\pi = \sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i)\cdot F(\sigma_i,\alpha,\beta,\ldots) \tag{11}$$

Функцию F здесь назовем «когнитивной функцией», которая содержит экзогенную информацию (относительно ресурсов, полезностей, вероятностей, субъективных вероятностей) [22], а также эндогенную информацию о субъекте (эндогенные параметры α,β).

Предполагается, что распределение $\pi(\sigma_i)$ максимизирует функцию:

$$\Phi_\pi = -\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i)\cdot\ln\pi(\sigma_i)+\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i)\cdot F(\sigma_i,\alpha,\beta,\ldots)+\gamma\cdot\sum_{i=1}^{N}\pi(\sigma_i) \tag{12}$$

Здесь второй член представляет собой взвешенный по предпочтениям $\pi(\sigma_i)$ ряд когнитивных функций. В данном случае величина E_π не определена заранее, поэтому (11) не рассматривается как изопериметрическое условие. Третий член, наоборот, есть следствие изопериметрического ограничения (8). Отыскивая максимум Φ_π по $\pi(\sigma_i)$, находим:

$$\pi(\sigma_i) = \frac{e^{F(\sigma_i,\alpha,\beta,\ldots)}}{\sum_{q=1}^{N} e^{F(\sigma_q,\alpha,\beta,\ldots)}} \tag{13}$$

Назовем это распределение, следуя терминологии Стратановича [23] каноническим. Суть вариационного принципа [24], сводится к тому, что с его помощью устанавливается отображение на S_a множества когнитивных функций на множество π. При некоторых условиях это отображение является гомеоморфизмом.

Вариационный принцип был предложен Джейнсом [24] в 1956-57 гг. для задач физической кинетики и формулировался для распределения вероятностей $p(\sigma_i)$. Существенное отличие состоит в том, что в данном случае он служит для определения распределения предпочтений, которые не являются вероятностями.

В частном случае когнитивная функция может представлять собой вероятность достижения определенногорезультатаприразрешениипроблемы $(\sigma_i \to \sigma_j)$ или субъективную вероятность [22]. Таким образом, постулирование вариационного принципа Джейнса применительно к распределениям предпочтений дает количественную модель $\pi(\sigma_i)$, которая открывает возможность решения ряда задач, связанных с прогнозированием поведения субъекта, в тех или иных условиях при расследовании уже произошедших событий, например, авиационных происшествий, развития конфликтных ситуаций и т.д.

С помощью субъективной энтропии определим субъективную информацию. Пусть событие А приводит к изменению распределения предпочтений, а также, может быть к изменению множества S_a (числа и содержания альтернатив). Обозначим через $H_\pi(A)$ субъективную энтропию после события А. Будем говорить, что с А связана субъективная информация:

$$I(|A) = H_\pi - H_\pi(|A) \tag{14}$$

Если рассматриваются распределения «двухточечные» $\pi(\sigma_i,\sigma_j)$, «трехточечные» $\pi(\sigma_i,\sigma_j,\sigma_k)$, то вводится соответствующая субъективная энтропия и субъективная информация. Так для «двухточечного» распределения $\pi(\sigma_i,\sigma_j)$, где имеются в виду различные одношаговые пути (рис. 2), можно определить энтропию:

$$H_\pi = -\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\pi(\sigma_i,\sigma_j)\cdot\ln\pi(\sigma_i,\sigma_j) \tag{15}$$

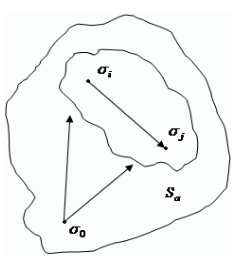


Рис. 2. «Двухточечные» распределения с разными одношаговыми путями

Если допустить, что справедливо соотношение:

$$\pi(\sigma_i,\sigma_j) = \pi(\sigma_j)\cdot\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j), \tag{16}$$

где $\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j)$ – условное предпочтение, используя (16) получим $H_\pi = H_{\pi_j} + \sum_{j=1}^{N}\pi(\sigma_j)\cdot H_{\pi(i|j)}$.

В общем случае $\pi(\sigma_i,\sigma_j) \neq \pi(\sigma_j,\sigma_i)$.

Информация субъективной связности двух альтернатив определяется формулой:

$$I = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\pi(\sigma_i,\sigma_j)\cdot\ln\frac{\pi(\sigma_i,\sigma_j)}{\pi(\sigma_i)\cdot\pi(\sigma_j)} \tag{17}$$

Полагая, что $\pi(\sigma_i,\sigma_j) = \pi(\sigma_j)\cdot\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j)$, запишем

$$I = \sum_{i=1}^{M}\pi(\sigma_j)\cdot\sum_{j=1}^{N}\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j)\cdot\ln\frac{\pi(\sigma_j)\cdot\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j)}{\pi(\sigma_i)\cdot\pi(\sigma_j)} \tag{18}$$

Если альтернативы σ_i и σ_j субъективно независимы, то $\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j) = \pi(\sigma_i)$, то

$$\ln\frac{\pi(\sigma_j)\cdot\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j)}{\pi(\sigma_i)\cdot\pi(\sigma_j)} = \ln\frac{\pi(\sigma_i)\cdot\pi(\sigma_j)}{\pi(\sigma_i)\cdot\pi(\sigma_j)} = 0 \tag{19}$$

Взаимная информация (информация связи) в этом случае равна нулю.

Использование технологии, основанной на соотношениях для взаимной информации, позволяет исследовать вопросы информационной связности последовательности решаемых проблем, либо проблем, решаемых одновременно.

Как будет видно в дальнейшем, понятия и соотношения взаимной информации могут быть применены к анализу информационной связности субъектов внутри группы.

Следующим важным допущением является предположение о психической (или эмоциональной) «температуре» - T_{subj}.

Выбирая $F(\sigma_i,\alpha,\beta,...)$ в виде $\pm\beta\cdot F(\sigma_i)$, получим распределение:

$$\pi(\sigma_i) = \frac{e^{\pm\beta\cdot F(\sigma_i)}}{\sum_{q=1}^{N} e^{\pm\beta\cdot F(\sigma_q)}} \tag{20}$$

Оно формально совпадает с распределением Гиббса в физической кинетике, где величина $T = \beta^{-1}$ играет роль абсолютной температуры. Водя по аналогии «психическую» температуру T_{subj}, мы получаем важный эндогенный параметр, характеризующий состояние психики субъекта. Из формулы (20) следует, что если $\beta \to 0$ $(T \to \infty)$, распределение $\pi(\sigma_i)$ стремится к равномерному:

$\pi(\sigma_i) \to \frac{1}{N}$, а энтропия $H_\pi \to H_{\pi\max} = \ln N$. Наоборот, если $\beta \to \infty$ $(T \to 0)$, то при условии, что не все $F(\sigma_i)$ одинаковы, распределение $\pi(\sigma_i)$ стремится к сингулярному: $\pi(\sigma_i) = 1$; $\pi(\sigma_j)|_{j\neq i} = 0$.

Можно показать, что при 0 и $\pi(\sigma_i) \to \frac{1}{N}$; $\pi(\sigma_i\,|\,\sigma_j) \to 0$ $(\forall i,j \in \overline{1,N})$, информация связи I=lnN.

Рейтинговые предпочтения в группах субъектов

Наряду с предметными предпочтениями $\pi(\sigma_i)$, $\pi(\sigma_j|\sigma_i)$ в группах субъектов вводятся рейтинговые предпочтения. Как и ранее справедливы все основные гипотезы, в том числе, требование, согласно которому каждое распределение рейтинговых предпочтений должно иметь своего индивидуального «носителя».

Пусть группа состоит из М субъектов. Будем говорить об условном рейтинге субъекта j «в глазах субъекта» i $\xi(j|i)$ и об абсолютном (интегральном) рейтинге субъекта j: $\xi(j)$ в том случае, если все члены группы (в том числе он сам) склонны присваивать субъекту j один и тот же рейтинг.

Можно рассматривать дифференциальные рейтинги $\xi(j|\sigma_k)$; $\xi(j|i,\sigma_k)$. Рейтинговый показатель $\xi(j|\sigma_k)$, в частности, определяет рейтинг «сапожника среди сапожников». Возникает вопрос об агрегировании рейтинговых предпочтений. Существует несколько возможных схем агрегирования. Например, можно положить, что:

$$\xi(j)=\sum_{i=1}^{M}\xi(j|i); \tag{21}$$

$$\xi(j|i)=\frac{1}{N}\cdot\sum_{k=1}^{N}\xi(j|i,\sigma_k); \tag{22}$$

$$\xi(j|i)=\sum_{k=1}^{N}\pi(\sigma_k)\cdot\xi(j|i,\sigma_k) \tag{23}$$

Энтропийные пороги и пороги различимости предпочтений

Важной гипотезой субъективного анализа является предположение о существовании энтропийных порогов и порогов различимости альтернатив.

Введение энтропийных порогов приводит к тому, что энтропийное пространство приобретает структуру. Дополнительно открывается путь для экспериментального наблюдения эволюции предпочтений и параметрической идентификации их распределений.

Рассмотрим эволюцию энтропии H_π при возникновении проблемной ситуации (рис. 3).

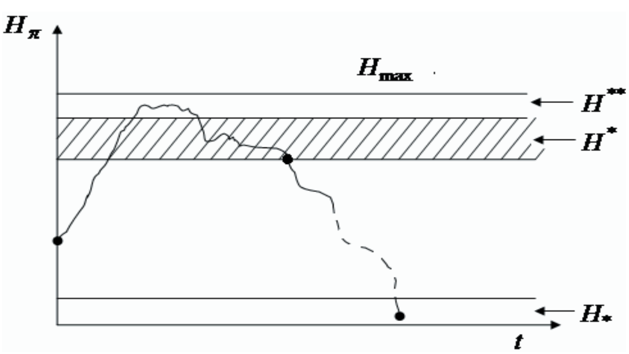


Рис. 3. Изменение энтропии во времени

Если проблема сложная и сопряжена с опасностями, энтропия возрастает и может попасть в область $H^{**}\le H_\pi \le H_{max}$. Здесь чрезвычайно высока неопределенность – состояние психического хаоса (стресс, истерия). Со временем психика успокаивается, и энтропия попадает в область $H^{*}\le H_\pi \le H^{**}$. Эту область можно назвать областью «свободы» или областью «дискуссии».

Здесь происходит осмысленный сравнительный анализ альтернатив, наполнение дополнительной информацией, в результате чего энтропия снижается и пересекает «сверху – вниз» порог H^* – порог «принятия решения». Область $H^{*}\le H_\pi \le H_*$ назовем областью «необходимости». Здесь происходит структуризация системы, дальнейшее уменьшение неопределенности и реализация уже принятых решений. Наконец, энтропия может попасть в область $0\le H_\pi \le H_*$. Эту область мы определяем как ситуацию, из которой «нет выхода». В этом смысле наша система нетранзитивна. Происходит своего рода «зомбирование» субъекта.

Можно определить информационную «емкость» каждой из описанных областей. Например, для области дискуссии:

$$I(H^{*}\to H^{**})=H^{**}-H^{*} \tag{24}$$

Предполагается, что никакие ресурсы не выведут систему из области $0\le H_\pi \le H_*$. Субъект, энтропия которого находится в этой области, является предельным фанатиком – сторонником принятого решения.

Аналогично рис. 3 изменяется энтропия для рейтинговых предпочтений.

По-видимому, существуют некие пороги различимости альтернатив. Наконец, естественным является предположение о подвижности порогов. Разработаны определенные модели динамики порогов. Необходимыми условиями принятия решения являются следующие: $H_\pi \le H^*$; $\dot{H}_\pi < 0$; скорость подачи информации не должна превышать 50 бит/сек.

Модель подвижности энтропийного порога выглядит следующим образом:

$$H^{*}=f(\ln N)+\left(H_0-f(\ln N)\right)\cdot e^{-h\cdot\tau^{-2}}, \tag{25}$$

где H^* – энтропийный порог; H_0 – начальная энтропия, h – коэффициент воли, N – количество альтернатив, τ – остаточное время.

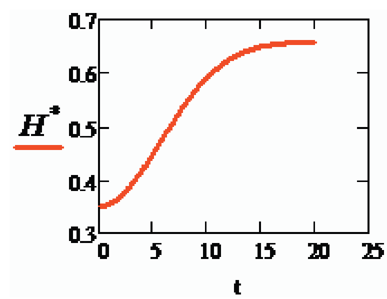


Рис. 4. Модель подвижности энтропийного порога

Становится очевидным, что с течением времени энтропийный порог повышается. Это говорит об увеличении вероятности выбора не наилучшего решения.

Приведем количественный пример влияния рейтингов на принятие решения.

Предположим, что во время захода на посадку возникает усложненная полетная ситуация. Перед экипажем возникает, на их взгляд, две возможные альтернативы выхода из сложившейся ситуации: продолжать посадку, либо же уходить на второй круг. В их распоряжении определенный запас времени. Сделаем допущение, что в обсуждении принимает участие не член экипажа, тогда посмотрим, каким образом это может повлиять на исход. У каждого субъекта есть свой рейтинг в глазах 1-го пилота и его необходимо учитывать при моделировании. Используя формулу (23) для агрегирования были получены следующие результаты.

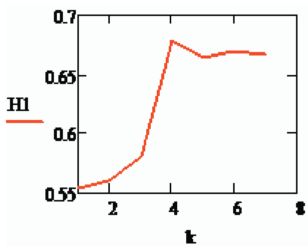


Рис. 5. Зависимость энтропийного порога от отношения рейтингов

Где H1 - энтропийный порог принятия решения, k - отношения рейтингов двух субъектов принимающих решения. Главным результатом есть следующее: при равных рейтингах субъектов энтропийный порог принятия решения является максимальным, а значит, решение принимается при высоком уровне неопределенности, и как результат высока вероятность выбора не наилучшего решения.

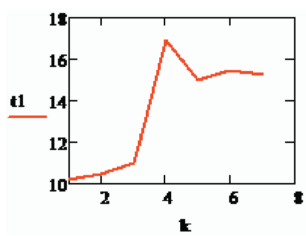


Рис. 6. Зависимость момента принятия решения от отношения рейтингов

где t1 - момент принятия решения, k - отношения рейтингов двух субъектов принимающих решения. Из выше приведенного графика становится ясно, что при равных рейтингах субъектов время, которое затрачивается на принятие решения максимально, что негативно сказывается на полетной ситуации.

Выводы

В данной работе предложен альтернативный подход к моделированию роста «человеческого фактора» в авиации. Подход основан на априорно постулируемых допущениях, в частности, на принципе максимума субъективной энтропии. Использование этого принципа позволяет восполнить недостатки статистических данных.

Литература

1. Энциклопедия безопасности авиации [Текст] Под ред. Н.С. Кулика – К.: Техника, 2008. – 1000с.
2. Безпека авіації. Під ред. Бабака В.П. — К.: Техніка, 2004. — 584 с.
3. Ошибки пилота: человеческий фактор / Пер. с англ. А.С. Щербакова. – М.: Транспорт, 1986. – 262 с.
4. Безопасность полетов: Учебник для вузов \ Р.В. Сакач, Б.В. Зубков, М.Ф. Давиденко и др. ; Под. Ред. Р.В. Сакача. – М.: Транспорт, 1989. – 239 с.
5. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1986. – 223 с.
6. Doc 9683-AN/950. Руководство по обучению в области человеческого фактора. – Канада, Монреаль, первое издание, 1998. – 370 с.
7. Doc 9808-AN/765. Человечевкий фактор в системе мер безопасности гражданской авиации. – Канада, Монреаль, первое издание, 2002. – 120 с.
8. Циркуляр ИКАО 302-AN/175. Сборник материалов «Человеческий фактор» №16. Кросскультурные факторы и безопасность полетов. – Канада, Монреаль, 2004. – 52 с.
9. Doc 9859-AN/474. Руководство по управлению безопасностью полетов. – Канада, Монреаль, второе издание, 2009. – 318 с.
10. Барзилович Е.Ю., Зубков Б.В., Бецков А.В. и др. О новом подходе к определению эффективности точечных оценок показателей безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. – 2003. – №2.
11. Зубков Б.В. Новый методический подход к оценке безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. – 1998. - №6.
12. Коваленко И.Н. Анализ редких событий при оценке эффективности и надежности систем. – М.: Сов. радио, 1980.
13. Коваленко И.Н., Наконечный А.К. Приближенный расчет и оптимизация надежности. – К.: Наук. думка, 1989.
14. Belyaev Y.K. Bootstrap, resampling and Mallows wetter. Inst of Math. Statistics, UMEA, 1996.
15. Чернецкий В.И. Анализ точности нелинейных систем управления. – М. Машиностроение, 1968. – 247 с.
16. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. - М.: Синтег, 1999. – 128 с.
17. Mc. Ruer D.T., Graham D., Krendl E.S., Reiner W. Human pilot dynamices in compensatory systems. Theory, Models and Experiments with controlled element and forcing function variations, AFFDL-TR-65-15 (July 1965).
18. Mc. Ruer D.T., Hofmann L.F., Jex H.R., Moore G.P., Phoctan A.V., Weis D.H.,Wolkovich P. New approaches to human pilot/vehicle dynamics analysism Air flight Dynamics Laboratory, AFFDL-TR-150, Feb. 1968.
19. Pew R.W., Baron S. Perspectives in Human Performance Modelling, Automatica, Vol. 19, 1983. – P. 663-676.
20. Ирков В.А. Некоторые проблемы использования математических методов в практических процедурах формирования решений: Сб. трудов Всесоюзной конференции «Проблемы и методы принятия решений в организационных системах». – М.: ВНИИ системы исследования, 1981. – С. 15-29.
21. Левич А.П. Теория множеств, язык теории категорий и их применение в теоретической билогии. - М.: МГУ, 1981. - 189 с.
22. Гроот М. Оптимальные статистические решения. - М.: Мир, 1974. - 491 с.
23. Стратанович Р.Л. Теория информации. - М.: Сов. радио, 1975. - 424 с.
24. Jaynes E.T. Information Theory and Statistical Mechanics. I and II – Phys. Rev. №2, №4, 1957.
25. Касьянов В.А. Субъективный анализ: Монография. – К.: НАУ, 2007. – 512 с.