

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ОТОБРАЖЕНИЯ МЕТОДАМИ ЦЕНТРА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ

О.Игнатова

Основная цель системы информационно-справочного обеспечения полета космических аппаратов (КА) – формирование для всех категорий специалистов, участвующих в управлении, различных массивов данных, необходимых для принятия решений. И здесь важную роль играет эффективность работы системы отображения (СО) информации, для оценки которой служит набор критериев, количественно определяющих степень соответствия системы целям ее создания. Критерии должны быть наглядными, напрямую зависеть от работы системы, допускать ее оценку по результатам отображения полетных данных. Один из основных критериев работы СО, позволяющий сравнивать различные системы между собой, – ее релевантность, т.е. адекватность представляемой информации. Этот критерий может быть использован для сравнения существующих систем отображения при выборе одной из них или для сравнения различных вариантов одной и той же системы при ее проектировании или модернизации, чтобы оценить влияние изменений в системе на релевантность представляемой информации. Какие же методы количественной оценки характеристик СО разработаны Центром управления полетами (ЦУП) для обеспечения релевантности представляемой информации?

Функции, выполняемые ЦУП при управлении полетом КА, включают подготовку к полету, планирование операций, интеграцию данных, моделирование, сбор, обработку, отображение данных и видеоинформации в реальном времени в ходе сеансов и/или после сеансов связи, взаимодействие с информационно-вычислительными комплексами (ИВК) и средствами ЦУП и группы управления [1]. Важную роль при управлении полетом играет информация, производимая СО. Поскольку при определении эффективности и качества СО рассматривается как отображение информации в целом, так и отдельных ее составляющих (сюжетов или их совокупности), одновременная оценка всех показателей невозможна. Поэтому на практике

выбирают компромиссное решение: один из критериев оптимизируется, а остальные служат в качестве ограничений [2].

Основные показатели эффективности – релевантность [3], нагрузка на внимание оператора, в первую очередь на его зрительное восприятие [4], и эффективность функционирования входящих в состав СО технических и программных средств, которые оцениваются вспомогательными критериями (см. таблицу). Наиболее значимый критерий эффективности системы отображения – ее способность предоставлять релевантную информацию. Она должна соответствовать потребностям выполняемой задачи и обеспечивать высокую степень практической применимости результата специалистами для оперативной оценки ситуаций

и прогнозирования их развития, т.е. для поддержания ситуационной осведомленности специалистов по управлению [3].

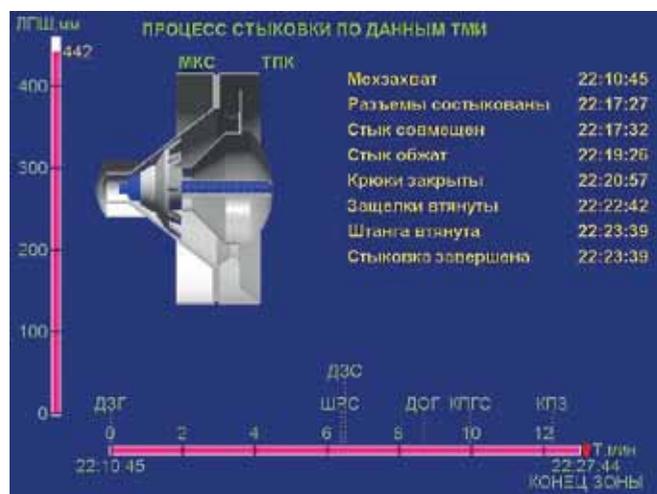
Как видно из таблицы, при определении количественных показателей характеристик системы отображения с использованием выбранных критериев релевантности применяются методы статистического анализа [6] с расчетом математического ожидания наступления того или иного события и анализируются экспериментальные данные, полученные в ходе оперативных работ, связанных с различными пилотируемыми и автоматическими КА.

Наиболее значимые аспекты релевантности информации – оперативность, полнота представления и достоверность [5].

ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ РЕЛЕВАНТНОСТИ

В качестве примера рассмотрим расчет ЦУП трех основных критериев релевантности СО при обеспечении стыковки – оперативности получения и отображения полетной информации транспортных кораблей (ТК) и российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС), достоверности полученных данных и полноты их представления. Выбранные критерии рассматриваются на примере формы отображения – формуляра стыковки и стягивания ТК с МКС (см. рисунок).

Следует отметить, что система отображения воспроизводит небольшой фрагмент последовательности действий и событий, отражающий основные этапы управления КА, т.е.



Формуляр стыковки и стягивания ТК с МКС

"событие-отображение события". Основные задачи системы отображения при управлении КА – прием данных различных источников (ИВК служб управления полетом, систем моделирования, систем телевидения и т.п.), их обработка, преобразование в образы и знаковые формы и воспроизведение этих образов и форм.

Оперативность получения и отображения полетной информации позволяет специалистам при максимально благоприятных условиях принять наиболее эффективные решения, своевременно и быстро реагировать на события, особенно в условиях нештатных ситуаций, приступить с минимальной задержкой

Критерии определения эффективности системы отображения, используемой при организации управления полетом КА, и методы их количественной оценки

Критерий	Метод оценки
Оперативность получения и отображения полетной информации	Отношение требуемого интервала времени выполнения задачи к реальному интервалу времени выполнения задачи ($t_{\text{треб.}}/t_{\text{реальн.}}$)
Достоверность полученных данных	Расчет коэффициента достоверности отображаемого параметра
Полнота представления данных	Метод экспертных оценок с учетом "веса" параметра
Нагрузка на зрение специалиста	Расчет числа сюжетов, адекватно воспринимаемых специалистом [4]
Возможность модернизации ПО и технических средств (ТС), состав ТС, кривая обучения оператора, состав доступной информации базы данных и базы знаний системы отображения	—

к анализу полученных данных для выработки управляющих действий. В случае рассматриваемого формуляра стыковки оперативность предоставления информации о том, произошло событие или нет (произошел мехзахват или нет), является наиболее важной характеристикой СО.

Получение и обработка информации происходит в темпе поступления данных с борта КА и от наземных служб. Основные количественные показатели оперативности – время поступления информации и интервал времени (в зависимости от конкретной задачи), необходимый для адекватного выполнения задачи. Время получения информации зависит от источников информации, средств ее передачи, приема и обработки. Исходя из особенностей воспроизводимого СО фрагмента последовательности, можно сформулировать требования к времени отображения фрагмента и его отдельных отрезков, например, к интервалу между поступлением сигнала и изменением отображаемой информации на экране. Следует также учитывать возможное влияние других отрезков времени на общее время отображения. Интервал времени представляется соотношением требуемого времени выполнения задачи к реальному времени выполнения задачи ($t_{\text{треб.}}/t_{\text{реальн.}}$)

Требуемый интервал времени от измерения до отображения кадра ($t_{\text{треб.}}$) для формуляра не превышает 2 с. Этот показатель определен в "Протоколе взаимодействия служб коллективных средств отображения (КСО) и телеметрического (ТМ) ИВК ЦУП" на основе расчетных и экспериментальных данных, подтвержденных многолетней практикой отображения полетной информации. Значение времени получения информации ($t_{\text{пол.инф.}}$) складывается из значений времени получения данных от источника (КА) ($t_{\text{ист.}}$), равного 0,1–0,5 с, времени передачи данных средствами связи ($t_{\text{перед.}}$) – 0,2–0,5 с и времени обработки полученных данных комплексами ЦУП ($t_{\text{обр.}}$) – 0,1–0,5 с, т.е. $t_{\text{пол.инф.}} = t_{\text{ист.}} + t_{\text{перед.}} + t_{\text{обр.}}$

Рассчитаем математическое ожидание значения реального времени $t_{\text{реальн.}}$. Очевидно, оно равно сумме математических ожиданий перечисленных выше составляющих $t_{\text{ист.}}$, $t_{\text{перед.}}$, $t_{\text{обр.}}$. Каждый из этих элементов можно рассматривать как непрерывную случайную величину, имеющую собственную функцию распределения. Таким образом, время получения информации рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} M[t_{\text{пол.инф.}}] &= M[t_{\text{ист.}}] + M[t_{\text{прд.ср.св.}}] + M[t_{\text{обр.}}] = \\ &= \int_{t_{\text{ист.мин}}}^{t_{\text{ист.макс}}} t_{\text{ист.}} p(t_{\text{ист.}}) dt_{\text{ист.}} + \\ &+ \int_{t_{\text{прд.ср.св.мин}}}^{t_{\text{прд.ср.св.макс}}} t_{\text{прд.ср.св.}} p(t_{\text{прд.ср.св.}}) dt_{\text{прд.ср.св.}} + \\ &+ \int_{t_{\text{обр.мин}}}^{t_{\text{обр.макс}}} t_{\text{обр.}} p(t_{\text{обр.}}) dt_{\text{обр.}}, \end{aligned}$$

где M – математическое ожидание; p – плотность вероятности значения t .

Рассмотрим частный случай: минимальное время получения информации в формуляре о мехзахвате составляет 0,4 с, максимальное – 1,5 с. Предположим, что распределение всех трех элементов $t_{\text{реальн.}}$ – равномерное. Тогда $M[t_{\text{реальн.}}]$ составит 0,95 с. Расчетное значение показателя оперативности $K_{\text{опер.}}$ для отображения на формуляре параметра "мехзахват" определяется формулой:

$$K_{\text{опер.}} = \frac{t_{\text{треб.}}}{M[t_{\text{реальн.}}]}$$

Для рассматриваемого случая $K_{\text{опер.}} \approx 2,105$.

При отображении этого параметра на основе информации, поступающей через американские средства связи, возможна задержка, которая может достигать 30 с. В этом случае значение показателя оперативности отображения на формуляре параметра "мехзахват" составит $\approx 0,131$, что говорит о существенном снижении оперативности отображения информации. Критерий определен так, что $K_{\text{опер.}} > 1$ означает достаточную оперативность отображения данной формы предоставления информации и чем больше это значение, тем выше оперативность. Значения $K_{\text{опер.}} < 1$ соответствуют недостаточной оперативности отображения информации.

Достоверность полученных данных определяет насколько отображаемая системой информация соответствует текущей ситуации, позволяет оценивать ее адекватность текущему заданию, принимать эффективные решения, проводить анализ полученных данных с гарантией достоверности результата. Этот критерий может быть представлен в долевого соотношении, т.е. в виде процента соответствия и достоверности полученных данных.

Существует ряд параметров, для которых необходимо знать его значение. Каждый параметр

отслеживается и отображается на протяжении заданного интервала времени. И в каждый момент времени существует некоторое отклонение значения отображаемого параметра от расчетного, по которому и определяется его достоверность. Если усреднить полученные на заданном интервале времени результаты определения достоверности, можно получить ее среднее значение для рассматриваемого параметра.

Средний и максимальный коэффициенты достоверности отображения параметра определяются из отношения максимальной или средней абсолютной разности значений расчетного $X_{\text{расч.}}$ и отображаемого $X_{\text{отобр.}}$ параметров к диапазону его допустимых значений.

$$K_{\text{дост. макс}} = 1 - \frac{\max(|X_{\text{отобр.}}(t) - X_{\text{расч.}}(t)|)}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}$$

и

$$K_{\text{дост. ср.}} = 1 - \frac{\sigma(X_{\text{отобр.}}(t) - X_{\text{расч.}}(t))}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}},$$

где $\sigma(X_{\text{отобр.}}(t) - X_{\text{расч.}}(t))$ – среднеквадратическое отклонение разности значений расчетного и отображаемого параметров. Расчет критерия упрощается, если рассматривать $X_{\text{расч.}}$ и $X_{\text{отобр.}}$ как набор дискретных значений:

$$K_{\text{дост. макс}} = 1 - \frac{\max(|X_{\text{отобр.}i} - X_{\text{расч.}i}|)}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}$$

и

$$K_{\text{дост. ср.}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_{\text{отобр.}i} - X_{\text{расч.}i}|}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}.$$

Рассмотрим в качестве примера расчетное значение коэффициента достоверности отображения параметра "ход штанги" (ЛПШ) в формуляре стыковки при поступлении телеметрических данных через американские средства связи в режиме contingency (расчетной нештатной ситуации) при отображении параметра "ход штанги", когда происходит небольшое запаздывание. Этот параметр измеряется в течение ~10 мин, максимальное его значение – 442 мм, запрос параметра производится программой один раз в 2 с. Используя разработанный метод расчета, получим среднее значение коэффициента достоверности ~99,432%, что является приемлемым результатом.

Полнота представленных данных характеризует состояние системы отображения, т.е. как она сконфигурирована для обеспечения специалистов адекватной информацией о происходящих на борту процессах и об окружающей обстановке.

При оценке соответствия актуальным потребностям и достоверности полученных данных выделяется некоторый состав необходимой информации, а именно множество N отображаемых параметров, которые обеспечивают выполнение задачи. При этом реально получают множество M реально отображаемых параметров, которое состоит из двух основных подмножеств: N_R – необходимая реально получаемая информация и K_B – избыточная информация. $N_R \cup K_B = M$. Эти подмножества не пересекаются: $N_R \cap K_B = 0$. Каждое подмножество N_R и K_B можно охарактеризовать некоторой величиной, описывающей информационную насыщенность всех элементов множества.

При оценке соответствия полученных данных актуальным потребностям и их достоверности необходимо учитывать еще одну составляющую – избыточность информации. Избыточная информация в форме представления информации может, прежде всего, отвлекать внимание специалиста от необходимых данных (т.е. привести к бесполезной его нагрузке), занять рабочее пространство дисплея и тем самым лишить специалиста возможности наблюдать необходимые данные или значительно усложнить его работу. Представить избыточность можно в виде соотношения M/K . Теоретически, это соотношение может принимать значения от 0 до ∞ . Оценить полноту представленных СО данных можно тремя способами.

Рассчитать полноту в зависимости от "веса" представляемых параметров. Здесь используется метод экспертных оценок. Имеется набор необходимых параметров для представления, у каждого из которых свой "вес", т.е. экспертная оценка его значимости в отображении. "Вес" параметра может быть определен группой экспертов с помощью различных методов получения экспертной информации (метода "мозговой атаки", "сценариев", "совещаний", метода Дельфи) [7]. Полнота представленных данных может быть выражена следующей формулой:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{\sum_{j=1}^n A_j},$$

где A_i и A_j – экспертные оценки ("веса") элементов; $m = |N_R|$ – число элементов подмножества N_R ; $n = |N|$ – число элементов подмножества N . Частный случай предыдущего способа расчета полноты – экспертная оценка "веса" элементов не производится и априорно N_R и N_B приняты равными. Тогда полнота представленных дан-

ных выражается формулой $K_{\Pi} = \frac{|N_R|}{|N|}$.

Рассмотрим расчет полноты в зависимости от скорости информационного потока с использованием метода расчета на основании объективных характеристик представляемых параметров. Информационная насыщенность параметров рассчитывается на основе шенноновского определения количества информации [8]. Если Z – число значений, которые может принимать параметр, t – период, в течение которого производится измерение, то полнота представленных данных может быть выражена следующей формулой:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\log_2 Z_i}{t_i}}{\sum_{j=1}^n \frac{\log_2 Z_j}{t_j}},$$

где $\log_2 Z$ – количество информации в значении параметра; t_i и t_j – периодичность измерений.

Если же рассматривать этот метод расчета для всех возможных сюжетов отображения, учитывая все параметры, необходимые для отображения, то формула принимает следующий вид:

$$K_{\Pi} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} \frac{\log_2 Z_{ij}}{t_{ij}}}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\log_2 Z_{ij}}{t_{ij}}},$$

где k – число сюжетов отображения; m_i – число отображаемых параметров; j – номер параметра в сюжете; n_i – число необходимых отображаемых параметров.

Используя метод экспертных оценок, рассчитаем несколько вариантов полноты представления данных в формуляре стыковки. Возможны ситуации, когда формуляр не может быть завершен, например, в случае, если весь процесс стягивания объектов (ТК и МКС) по времени не укладывается в зону видимости российских наземных измерительных пунктов (НИП). Как уже отмечалось, наиболее важными

параметрами формуляра являются параметры "мехзахват" и "ход штанги". Но наличие остальных параметров также подтверждает, что процесс стягивания идет без замечаний (штатно) или с замечаниями (при задержке одного из параметров), что предоставит специалистам материал для последующего анализа работы системы управления. Отсутствие этих параметров значительно ухудшает операционное понимание ситуации специалистами.

Существующие в настоящее время возможности средств связи и протокол взаимодействия ЦУП-М (Москва) и ЦУП-Х (Хьюстон) устанавливают минимальное число параметров рассматриваемого формуляра, а именно – "мехзахват" и "закрытие крюков". Эти параметры могут быть получены СО ЦУП даже вне зоны видимости российских НИП через американские средства связи. Наличие параметра "закрытие крюков" подтверждает, что стыковка практически завершена, осталось только закрыть защелки и втянуть штангу стыковочного механизма. По своей значимости этот параметр можно приравнять к мехзахвату и ходу штанги.

Максимальное число параметров в зоне видимости – восемь и параметр "ход штанги", который выделяется особо, так как является динамическим (меняющимся в течение всего процесса стягивания) и его значения наглядно показывают, насколько штатно проходит операция. Таким образом, наиболее "весомые" параметры – "мехзахват", "закрытие крюков" и "ход штанги", остальные шесть – вспомогательные.

При расчете критерия "полнота представления информации" первым методом примем, что при отображении всех девяти параметров полнота представления информации равна 100%, коэффициент полноты $K_{\Pi} = 1$. Из девяти параметров три, наиболее важные, будут иметь "вес" в два раза больший, чем остальные шесть. Рассчитаем коэффициент полноты представления информации в случае:

- стыковки вне зоны радиовидимости российских НИП, когда формуляр отображает только два параметра, но с максимальным "весом", в этом случае $K_{\Pi} = 0,3333$;
- стыковки в зоне радиовидимости российских НИП, когда формуляр заполняется не полностью, а, например, до параметра "стык обжат", $K_{\Pi} = 0,5833$;
- стыковки в зоне радиовидимости российских НИП, когда формуляр заполнится до параметра "крюки закрыты", $K_{\Pi} = 0,75$.

Разработанные методы позволяют рассчитать коэффициенты оперативности отображения информации, достоверности и полноты ее представления. Рассмотренный пример демонстрирует возможность применения приведенных коэффициентов для динамических сюжетов, отображаемых во время информационного обеспечения управления полетом КА на динамических участках полета. Перечисленные критерии позволяют оценить релевантность отображения каждого конкретного сюжета представления информации.

С помощью методов экспертных оценок можно корректно оценить значимость отображаемых параметров и, соответственно, рассчитывать с достаточной точностью показатель полноты представления данных СО. Многолетний опыт эксплуатации СО ЦУП дает возможность применять рассмотренные методы с высоким показателем достоверности, полученным в результате экспертных оценок. Поскольку СО ЦУП не является замкнутой системой и напрямую воспроизводит поступающие данные, то использование шенноновского метода определения количества информации позволяет получить количественную оценку (в процентном отношении) потерь информации, напрямую зависящих от качества канала связи.

Сюжеты, воспроизводимые СО и используемые при организации информационного обеспечения управления полетом КА, подразделяются на базовые (при работе в круглосточном режиме и на динамических участках полета) и вспомогательные. При проведении каждой операции по управлению полетом КА из ЦУП набор базовых сюжетов отображения конечен, и можно оценить релевантность отображения каждого из них. Используя метод экспертных оценок (например, ранжирование), можно установить приоритеты сюжетов и оценить, насколько эффективно система отображения работала при обеспечении конкретной операции управления КА. Установив приоритеты каждой операции, можно оценить эффективность работы системы в целом. Полученные в процессе оценки данные позволят сформулировать те требования к релевантности (как в целом, так и по отдельным аспектам), которые должны быть достигнуты при разработке новых или модернизации существующих программных средств системы отображения ЦУП.

* * *

Таким образом, определение основных критериев релевантности с помощью описанных методов служит основой для общей оценки релевантности представления информации системой отображения. При разработке некоторых методов оценки характеристик СО ЦУП были использованы системный анализ, экспертные оценки, шенноновское определение количества информации и связанное с этим устранение ее избыточности при передаче сообщений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Милицин А.В., Самсонов В.К., Ходак В.А., Литвак И.И.** Отображение информации в Центре управления полетами. – М.: Радио и связь, 1982.
2. **Антонов А.В.** Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2004.
3. **Endsley, M.R. and Garland D.J (Eds.).** Theoretical Underpinnings of Situational Awareness: a critical review. – Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2002.
4. **Столяров Н.Н.** Методы оценки эффективности систем отображения полетных параметров воздушного судна. – М.: МГТУ гражданской авиации, 2005.
5. **Решетников В.Н., Любимов Е.Б.** Система подготовки и отображения информации на экранах коллективного пользования. – Программные продукты и системы, 1997, №4.
6. **Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А.** Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика, 2002.
7. **Орлов А.И.** Современная теория измерений и экспертных оценок. – М.: Экономика и информатика, 2002.
8. **Стратонович Р.Л.** Теория информации – М.: Сов. радио, 1975.