

СТРАТЕГИЯ ВЫБОРА ПЕРСПЕКТИВНОГО ВАРИАНТА РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЗЗ

Л.Ф. ДАРГЕЙКО, Е.Н. БОДНАР, З.В. КОЗЛОВ, А.Д. ФЕДОРОВСКИЙ

Предлагается алгоритм выбора наиболее перспективного варианта развития космических систем ДЗЗ на основе процедуры экспертного оценивания и аппарата теории принятия решений.

Задача выбора перспективного варианта развития космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) особенно актуальна в условиях ограниченного финансирования, когда необходимо максимизировать достижение целевого эффекта в рамках имеющихся средств.

На основе системного анализа приоритетных тематических задач государственного и регионального уровней, реального научно-технического потенциала и достигнутых тактико-технических характеристик отечественных КС, анализа тенденций развития КС ДЗЗ вырабатываются варианты концепции развития КС «Січ» на период до 2015 г.

Речь может идти о двух возможных направлениях развития КС ДЗЗ [1]: во-первых, о КС ДЗЗ, состоящих из одного спутника, созданного по принципу «все в одном» (комплекс многоцелевой аппаратуры, одна система управления, энергоснабжения и телеметрии); во-вторых, о КС ДЗЗ, состоящих из многоспутниковых орбитальных группировок микроспутников, обеспечивающих высокую периодичность и надежность функционирования за счет резервных космических аппаратов. Число возможных вариантов реализации системы ДЗЗ и в том и в другом направлениях очень велико. КС — это совокупность концепции построения системы и вариантов всех элементов ее архитектуры. Концепция системы — это содержательное описание принципов работы системы (как система получает необходимые данные или выполняет задачи в целях удовлетворения потребностей конечных пользователей). Концепция системы содержит четыре основных элемента: доставка информации, планирование работы, управление, временной цикл. Каждый из элементов имеет несколько альтернативных вариантов.

Архитектура системы ДЗЗ характеризуется ее концепцией, целевым объектом, параметрами орбит, архитектурой связи и наземной системой.

То, с чем космическая система взаимодействует, либо то, что обследуется, наблюдается, измеряется посредством космической полезной нагрузки, называется объектом системы реализации. В настоящее время для Украины актуальными являются задачи, связанные с проведением земельной реформы, охраной окружающей среды и мониторингом чрезвычайных ситуаций [2]. В качестве таких объектов для систем дистанционного зондирования Земли могут быть типы растительности, вода или геологические образования.

Орбита — это траектория движения КС. Параметры орбит существенно влияют на все элементы системы и поэтому обуславливают многовариантность структуры системы.

Система связи — это совокупность компонентов, обеспечивающих выполнение требований по связи, передаче команд и управлению (контролю). Она в большой степени зависит от объема и временных характеристик данных, подлежащих передаче, а также от количества, расположения, доступности, информационных возможностей космических и наземных средств.

Наземная система (наземный сегмент) состоит из стационарных и мобильных наземных станций, размещенных в различных точках поверхности Земли и соединенных линиями передачи данных.

Таким образом, вариативность составных частей КС ДЗЗ порождает большое количество возможных вариантов ее построения. Необходимо выбрать из них наиболее перспективный. Особенность задачи оценивания вариантов ДЗЗ состоит в том, что они формулируются на описательном уровне, и выбор наиболее перспективного определяется множеством показателей эффективности, например, качеством информации зондирования, оперативностью доставки информации, периодичностью зондирования, технической реализуемостью, экономической эффективностью и т.д. Многие показатели не могут быть непосредственно измерены, вычислены или определены другими инструментальными средствами. Кроме того, они характеризуются информационной неопределенностью и будущими неопределенными ситуациями. Одним из источников реальной неопределенности, выявленным при проведении анализа проблемы, является недостаток информации о состоянии исследуемого объекта и технической базе элементов, из которых будет строиться система, о специфике научных задач, для решения которых предназначается прогнозируемая система. Эта неопределенность обусловлена тем, что последствия решений, принимаемых в настоящее время, сказываются через достаточно продолжительное время, а надежных методов предсказания развития событий на много лет вперед не существует.

В случае присутствия факторов неопределенности желательно использовать как качественные, так и количественные методы анализа, способствующие наибольшей ясности мышления. Без количественного анализа весьма трудно произвести убедительные сравнения различных вариантов достижения целей.

Из всего сказанного следует, что для решения задачи выбора перспективного варианта системы ДЗЗ необходимо использовать аппарат нечетких переменных, экспертные процедуры оценивания и аппарат теории принятия решений. Ниже остановимся на процедуре получения решения поставленной проблемы, выборе перспективного варианта ДЗЗ на основе перечисленных механизмов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ И ВЫБОРА ПЕРСПЕКТИВНОГО ВАРИАНТА

Оцениваемые варианты построения космической системы ДЗЗ представим в виде конечного множества $V = \{V_n \mid n = \overline{1, N}\}$.

Каждый вариант $V_n \in V$ характеризуется конечным множеством R показателей R_j , $R = \{R_j \mid j = \overline{1, J}\}$. Все показатели для каждого варианта имеют

лишь вербальное описание и не имеют конкретных значений. Необходимо выбрать наиболее перспективный вариант, т.е. вариант «наилучший» по всем критериям.

Предлагается экспертное оценивание вариантов и утилитарная количественная процедура многокритериального выбора наилучшего варианта.

Для проведения экспертного оценивания вариантов используем шкалу и нечеткие переменные, предложенные в работе Н.Д. Панкратовой [4].

Так как в условиях неопределенности человек не способен дать точную оценку, а может давать ее только с некоторой вероятностью и определенной уверенностью в такой оценке, в работах Н.Д. Панкратовой предлагается гипотетические значения каждого критерия разбить на семь или девять уровней градации от особо низкого до особо высокого [4]. Эксперт должен указать свое мнение о возможности (вероятности) реализации каждого уровня значения критерия. Нечеткая переменная определяет функцию принадлежности оценки к каждому уровню значений (табл. 1).

Таблица 1. Градация шкалы для оценивания вариантов по критериям

Номер уровня S	Количественная характеристика S -го уровня	Качественная характеристика S -го уровня	Оценки эксперта о возможности реализации S -го уровня значений критерия
1	0,00 – 0,10	Особо низкий	
2	0,10 – 0,25	Очень низкий	
3	0,25 – 0,40	Низкий	
4	0,40 – 0,60	Средний	
5	0,60 – 0,75	Высокий	
6	0,75 – 0,90	Очень высокий	
7	0,90 – 1,00	Особо высокий	

Итак, формируется группа E экспертов-специалистов E_k , $E = \{E_k | k = \overline{1, K}\}$. Каждый из них $E_k \in E$ проводит экспертизу на основе предоставленной ему информации в форме шкалы качественного и количественного оценивания показателей.

Эксперт независимо выполняет оценивание и не имеет информации об оценках других экспертов. Оценка j -го показателя n -го объекта (варианта) k -м экспертом определяется для каждого уровня $s \in S$, $S = [1, 7]$ значения показателя в виде нечеткой переменной $\tilde{R}_{njs}^k = \langle R_{njs}^k, \mu_{njs}^k \rangle$. Оценка показателей для всех вариантов формируется системой экспертного опроса в виде

$$\tilde{R}_{nj}^k = \left\{ \langle R_{njs}^k, \mu_{njs}^k \rangle | n \in N, j \in J, s = \overline{1, 7} \right\}, \quad (1)$$

где μ_{njs}^k — оценка k -го эксперта, определяющая его мнение о возможности j -го показателя для n -го объекта быть на уровне $s \in S_0$.

Оценка k -м экспертом n -го объекта в целом формируется системой экспертного опроса в виде массива

$$\tilde{R}_n^k = \left\{ \tilde{R}_{nj}^k | n \in N, j = \overline{1, J}, k \in K_0 \right\}, \quad K_0 = [1, K]. \quad (2)$$

Результаты экспертизы n -го объекта всеми экспертами формируются системой экспертного опроса в виде массива

$$\tilde{R}_n = \{\tilde{R}_n^k \mid n \in N; k = \overline{1, K}\}. \quad (3)$$

Проведем обработку экспертных оценок в соответствии с работой [5]. Определим обобщенное мнение группы экспертов по каждому показателю каждого варианта и каждого уровня гипотетических значений. Для этого вычислим среднее арифметическое по формуле $M_{njs} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \mu_{njs}^i$ для каждого уровня значений каждого показателя всех вариантов. (Можно использовать α^i — компетентность i -го эксперта, представленную числами $0 < \alpha^i \leq 1$, удовлетворяющими условию $\sum_{i=1}^K \alpha^i = 1$, тогда $M_{njs} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \alpha^i \mu_{njs}^i$.) Здесь M_{njs} — обобщенная оценка возможности n -го варианта по j -му показателю принимать значение, соответствующее s -му уровню градации.

Поскольку значение показателей оценивается для семи уровней возможных значений, определение обобщенной оценки является оптимизационной задачей. В качестве ее решения выбираем значение, обеспечивающее максимальное среднее, т.е. определяем номер уровня, для которого обобщенное мнение группы экспертов максимально.

$$s_{nj}^* = \arg \max_{s=1,7} M_{nj}^s. \quad (4)$$

Таким образом определяем для каждого варианта по каждому критерию наиболее вероятный уровень, т.е. уровень, степень возможности реализации значений которого имеет наибольшую обобщенную оценку.

Получив качественную оценку каждого варианта по каждому критерию (показателю), можно определить его количественную оценку в условной шкале. Количественная характеристика задана интервалом значений. Конкретизируем количественную оценку в соответствии с качественной. Для этого целесообразно положить: если степень возможности реализации некоторого уровня равна единице, то количественное значение оценки принимается равным верхнему значению интервала; если степень возможности реализации меньше единицы, то количественная оценка внутри интервала пропорциональна этой степени, что формально можно представить следующим образом:

$$R_{nj}^s = \underline{r}_{nj}^s + (\overline{r}_{nj}^s - \underline{r}_{nj}^s) M_{nj}^{s*}, \quad (5)$$

где \underline{r}_{nj}^s — нижняя граница интервала количественных значений характеристик s -го уровня; \overline{r}_{nj}^s — соответственно верхняя граница; M_{nj}^{s*} — обоб-

щенная оценка степени возможности реализации s^* -го уровня для n -го варианта по j -му показателю.

Теперь мы имеем количественные оценки всех вариантов по всем критериям. Нужно выбрать наилучший вариант. Это классическая задача многокритериальной оптимизации. Она может быть решена ЛПР с помощью известных методов [6, 7]. Учитывая предпочтения ЛПР, для разных целей использования космических систем могут быть получены различные варианты, но каждый из них будет принадлежать множеству эффективных решений, что позволит определять вариант развития ДЗЗ, соответствующий тому или иному возможному сценарию развития общества.

На основе изложенного решение задачи выбора перспективного варианта КС ДЗЗ можно свести к следующим процедурам.

1. Сформировать обобщенные качественные оценки в соответствии с (4) для всех вариантов $V = \{V_n | n = \overline{1, N}\}$ по всем показателям $R = \{R_j | j = \overline{1, J}\}$ на основе результатов оценивания (1)–(3) всеми экспертами $E = \{E_k | k = \overline{1, K}\}$.

2. Определить степень согласованности мнений экспертов по каждой обобщенной оценке. Воспользуемся коэффициентом вариации V_j оценок [5], полученных j -м показателем. Этот коэффициент определяется в соответствии с формулой $V_j = \frac{\sigma_j}{M_j}$, где σ_j — среднеквадратическое отклонение оценок, полученных j -м показателем $\sigma_j = \sqrt{D_j}$. Здесь D_j — дисперсия оценок j -го показателя, которая вычисляется по формуле $D_j =$

$$= \frac{1}{m_j - 1} \sum_{i=1}^{m_j} (C_{ij} - M_j)^2$$

где m_j — количество экспертов, оценивших j -й показатель; C_{ij} — оценка i -го эксперта для j -го показателя; M_j — среднее арифметическое значение величины оценки определенного уровня градации значений. Коэффициент вариации определяется для каждого показателя и характеризует степень согласованности мнений экспертов в оценке возможности j -го показателя реализовать полученное значение. Чем меньше значение V_j , тем выше степень согласованности мнений экспертов относительно значения j -го показателя.

3. Определить количественную оценку каждого варианта по каждому критерию в соответствии с (5).

4. Определить компромиссное решение многокритериальной задачи.

3. Определить количественную оценку каждого варианта по каждому критерию в соответствии с (5).

4. Определить компромиссное решение многокритериальной задачи.

МОДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

Чтобы не перегружать изложение, алгоритм экспертной процедуры оценивания возможных вариантов ДЗЗ и выбора наилучшего проиллюстрируем на примере задачи выбора из двух предполагаемых вариантов КС ДЗЗ: вариан-

тов A и B . Это не принципиально для процедуры оценивания и выбора, которая работает при любом как угодно большом количестве вариантов, критериев и экспертов. В качестве критериев оценки выбираем три показателя, которые нужно максимизировать. (Например: качество информации зондирования, оперативность доставки информации, техническая реализуемость и другие.)

Математическая постановка задачи для нашего примера выглядит следующим образом.

Оцениваемые варианты представлены в виде множества из двух элементов $V_1 = A, V_2 = B, N = 2$.

Каждый вариант $V_n \in V$ характеризуется конечным множеством R из трех показателей $R_j, j = 3$. Рассмотрим оценки четырех экспертов $E_k, K = 4$.

В следующих двух таблицах, соответственно для вариантов A и B , приведены оценки возможности реализации каждого из семи уровней значений, приведенных в табл. 1, для каждого из трех рассматриваемых показателей.

Таблица 2. Оценка варианта A по всем критериям $\{\mu_{1js}^k \mid j = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}, s = \overline{1,7}\}$

Критерий 1				Критерий 2				Критерий 3			
0,10	0,15	0,05	0,10	0,12	0,10	0,15	0,10	0,20	0,15	0,15	0,15
0,15	0,20	0,25	0,30	0,10	0,10	0,07	0,20	0,40	0,30	0,20	0,20
0,50	0,30	0,45	0,40	0,50	0,40	0,45	0,50	0,50	0,40	0,45	0,60
0,65	0,40	0,50	0,90	0,90	0,50	0,60	0,80	0,90	0,50	0,40	0,50
0,70	0,40	0,40	0,40	0,70	0,40	0,40	0,60	0,70	0,40	0,60	0,30
0,90	0,50	0,60	0,70	0,30	0,25	0,30	0,20	0,30	0,25	0,30	0,25
0,30	0,25	0,30	0,20	0,10	0,10	0,07	0,20	0,15	0,08	0,20	0,20

Таблица 3. Оценка варианта B по всем критериям $\{\mu_{2js}^k \mid j = \overline{1,3}, k = \overline{1,4}, s = \overline{1,7}\}$

Критерий 1				Критерий 2				Критерий 3			
0,20	0,10	0,15	0,10	0,10	0,15	0,05	0,30	0,12	0,10	0,15	0,15
0,40	0,30	0,10	0,20	0,15	0,15	0,17	0,40	0,10	0,10	0,17	0,20
0,50	0,40	0,45	0,70	0,50	0,40	0,45	0,70	0,50	0,40	0,70	0,50
0,70	0,50	0,40	0,50	0,65	0,70	0,50	0,60	0,90	0,70	0,60	0,80
0,60	0,70	0,60	0,30	0,90	0,50	0,60	0,80	0,70	0,80	0,30	0,60
0,30	0,30	0,30	0,20	0,70	0,40	0,40	0,60	0,30	0,25	0,20	0,25
0,10	0,20	0,20	0,20	0,30	0,25	0,30	0,20	0,10	0,10	0,07	0,20

Опишем процедуры алгоритма для рассматриваемого примера.

1. Определим обобщенные оценки (табл. 4), где M_{nj} — обобщенная оценка n -го варианта по j -му показателю.

Таблица 4. Обобщенные оценки вариантов, вычисленные по формуле (4)

Номер уровня S	Количественная характеристика S -го уровня качества	Вариант A			Вариант B		
		M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{21}	M_{22}	M_{23}
1	0,00 – 0,10	0,1000	0,1175	0,1625	0,1375	0,1500	0,1300
2	0,10 – 0,25	0,2250	0,1175	0,2750	0,2500	0,2175	0,1425
3	0,25 – 0,40	0,4125	0,4625	0,4875	0,5125	0,5125	0,5250
4	0,40 – 0,60	0,6125	0,7000	0,5750	0,5250	0,6125	0,7500
5	0,60 – 0,75	0,4750	0,5750	0,5000	0,5500	0,7000	0,6000
6	0,75 – 0,90	0,6750	0,2625	0,2750	0,2750	0,5250	0,2500
7	0,90 – 1,00	0,2625	0,1175	0,1575	0,1750	0,2625	0,1175

2. На этом этапе экспертной процедуры оценим *степень согласованности мнений экспертов*. В силу специфичности нашей экспертизы математическое ожидание всех оценок одного показателя лишено смысла. Будем вычислять коэффициент вариации для каждого уровня значений критериев. Так как полученные обобщенные оценки соответствуют четвертому и пятому уровням, вычислим коэффициенты вариации только для уровней, соответствующих обобщенным оценкам.

В этом случае формула для вычисления дисперсии будет иметь вид

$$D_{nj}^s = \frac{1}{4-1} \sum_{i=1}^4 (\mu_{nj}^s - M_{nj}^s)^2,$$

где n — номер варианта; j — номер показателя; s — номер уровня обобщенной оценки; M_{nj}^s — обобщенная оценка j -го показателя n -го варианта, которая принадлежит s -у уровню. Затем определим среднеквадратическое отклонение σ_j оценок и коэффициент вариации оценок V_j , полученных j -м показателем.

Поскольку вычисляются коэффициенты вариации для каждого варианта, обозначим среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации как функции от оцениваемых вариантов.

Для первого критерия первого варианта уровень обобщенной оценки — шестой. Оценки дисперсии, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации следующие:

$$D_{11}^6 = 1/3 * (0,225^2 + 0,175^2 + 0,075^2 + 0,025^2) = 0,0875,$$

$$\sigma_1(A) = \sqrt{D_{11}^6} = 0,296,$$

$$V_1(A) = \frac{\sigma_1(A)}{M_{11}} = 0,296/0,675 = 0,438.$$

Аналогичные расчеты проводим для всех критериев каждого варианта.

$$V_2(A) = \frac{\sigma_2(A)}{M_{12}} = 0,2608, \quad V_3(A) = \frac{\sigma_3(A)}{M_{13}} = 0,3856.$$

$$V_1(B) = \frac{\sigma_1(B)}{M_{21}} = 0,3149, \quad V_2(B) = \frac{\sigma_2(B)}{M_{22}} = 0,26, \quad V_3(B) = \frac{\sigma_3(B)}{M_{23}} = 0,172.$$

Расчеты показывают, что коэффициенты вариации для оценок, которые вошли в обобщенные оценки по всем показателям для всех вариантов меньше значения 0,5. Т.е. степень согласованности экспертов достаточно высока. Полученные на основе экспертизы оценки можно использовать для принятия решения о наиболее перспективном варианте развития ДЗЗ.

3. Вычислим количественные оценки, соответствующие полученным обобщенным качественным оценкам. Обобщенная оценка первого критерия для варианта A , соответствующая наибольшей средней оценке экспертов — 0,675, принадлежит *шестому уровню*, т.е. значение первого критерия для варианта оценивается как *очень высокое* и ему можно присвоить условную количественную оценку $R_1(A) = 0,75 + (0,9 - 0,75)0,675 = 0,851$.

По второму критерию для первого варианта наибольшая обобщенная оценка экспертов равна 0,7 и соответствует четвертому уровню (*т.е. аргумент — номер уровня, обеспечивающий максимальное среднее значение оценки, равен 4*), его количественная оценка $R_2(A) = 0,4 + (0,6 - 0,4)0,7 = 0,54$.

По третьему критерию обобщенная оценка экспертов для первого варианта равна 0,575, что соответствует четвертому уровню, и его количественная оценка $R_3(A) = 0,4 + (0,6 - 0,4)0,575 = 0,515$.

Аналогично определяются условные количественные оценки трех критериев для варианта B .

$$R_1(B) = 0,6 + (0,75 - 0,6)0,55 = 0,6825.$$

$$R_2(B) = 0,6 + (0,75 - 0,6)0,7 = 0,705.$$

$$R_3(B) = 0,4 + (0,6 - 0,4)0,75 = 0,55.$$

4. Задача принятия решения в нашем случае является задачей многокритериальной оптимизации следующего вида. Выбрать наилучший вариант $x \in X$, где $X = V = \{V_n | n = \overline{1, N}\}$ состоит из вариантов A и B , описанных выше. (Здесь и в дальнейшем, чтобы избежать громоздких обозначений, как принято в оптимизационных задачах, искомое решение будем обозначать x .)

Варианты характеризуются обобщенными условными количественными оценками по трем критериям:

$$R_1(A) = 0,851; \quad R_1(B) = 0,6825;$$

$$R_2(A) = 0,54; \quad R_2(B) = 0,705;$$

$$R_3(A) = 0,515; \quad R_3(B) = 0,55.$$

Итак, имеем два несравнимых с точки зрения математики вектора. Первый имеет более высокую оценку по первому критерию, второй — по второму и третьему. Как было сказано выше, существует много способов решения этой задачи, но они все характеризуются тем, что привносятся

человеческий фактор, задача доопределяется предпочтениями ЛПР. В зависимости от этих предпочтений выбирается тот или иной метод скаляризации многокритериальной задачи.

Пример. Если решение принимается по наихудшему критерию, т.е. используется стратегия пессимизма (наименьшего риска), то решение, обеспечивающее $\max_{x \in X} \min_j R_j(x)$, — второй вариант.

Если решение принимается по наилучшему критерию, т.е. используется стратегия оптимизма (наибольшего риска), то решение, обеспечивающее $\max_{x \in X} \max_j R_j(x)$, — первый вариант.

Если предпочтение отдается наибольшим значениям критериев, то стратегия является промежуточной между двумя предыдущими. Искомое решение при этом должно обеспечивать $\max_{x \in X} \left[\sum_{j=1}^n a_j R_j(x) \right]$, где a_j — важность, вес критерия. Если все критерии равнозначны, то получим второй вариант, если предпочтение отдается первому, — первый.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построен алгоритм для решения задачи выбора перспективного варианта развития космических систем ДЗЗ. В основу его положены методы обработки и анализа результатов экспертного оценивания, проводимого с использованием понятий и переменных теории нечетких множеств, и методы многокритериальной оценки.

Для иллюстрации работы алгоритма решен гипотетический модельный пример.

Анализ результатов показал, что разработанный алгоритм может успешно использоваться для решения такого класса задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wiley J. Larson Space Mission: Analysis and Design.* — Torrance: Microcosm Inc., Kluwer Academic Publishers. — 2000. — 800 p.
2. *Боднар Е.Н., Якимчук В.Г., Федоровский А.Д.* Оценка и выбор варианта космической системы ДЗЗ на основе метода анализа иерархий // Доп. НАН України. — 2005. — № 8. — С. 106–111.
3. *Оценка объема спроса национального рынка на информацию ДЗЗ высокого разрешения / В.Н. Астапенко, Е.И. Бушуев, В.П. Зубко и др.* // Космічна наука і технологія. — 2002. — 8, № 1. — С. 15–22.
4. *Панкратова Н.Д.* Математическое обеспечение задач технологического предвидения применительно к отрасли промышленности // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2003. — № 1 — С. 26–33.
5. *Бешенев С.Д., Гурвич Ф.Г.* Математико-статистические методы экспертных оценок. — М.: Статистика, 1980. — 259 с.
6. *Теория выбора и принятия решений: Учебное пособие.* — М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1982. — 328 с.
7. *Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования сложных систем управления / В.Л. Волкович, А.Ф. Волошин, Л.Ф. Даргейко и др.* — Киев: Наук. думка, 1984. — 216 с.

Поступила 13.12.2005