

УДК 528.8.04

А. Д. Федоровский, В. Г. Якимчук, Е. Н. Боднар, З. В. Козлов

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Оценка эффективности космических систем ДЗЗ на основе метода анализа иерархий

Надійшла до редакції 26.01.05

Обґрунтовується методика оцінки ефективності космічних систем ДЗЗ за допомогою методу аналізу ієрархій. На прикладі порівняння космічних систем з одним космічним апаратом і супутникового угруповання малих апаратів показана можливість вибору перспективного варіанту космічної системи для вирішення тематичних задач ДЗЗ.

Эффективность дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) при решении тематических задач научно-прикладной программы в значительной мере зависит от обоснованности выбора структуры космической системы (КС) ДЗЗ и параметров бортовой регистрирующей аппаратуры. При этом могут использоваться как большие космические аппараты (КА) с аппаратурой зондирования земной поверхности в оптическом и радиодиапазонах спектра, так и орбитальные группировки, состоящие из нескольких малых КА, оснащенных аналогичной регистрирующей аппаратурой, распределенной по разным КА. Так, например, возможен выбор КС ДЗЗ, состоящей из одного КА типа «Січ» или из орбитальной группировки микроспутников.

Поскольку каждому из альтернативных вариантов присущи свои достоинства и недостатки, принимать решение о выборе того или иного варианта КС для решения конкретных задач ДЗЗ достаточно проблематично. Цель данной статьи заключается в обосновании выбора варианта КС ДЗЗ путем сопоставления и оценки их эффективности в единой критериальной шкале.

Проблема заключается в том, что оценка эффективности альтернативных вариантов КС ДЗЗ не может ограничиться одним показателем, а носит довольно сложный характер, требующий многокритериальной оптимизации на базе имитационных моделей [3]. Сопоставление параметров вариантов КС ДЗЗ не по абсолютным значениям, а по степени относительной предпочтительности по каждому параметру дает возможность применить для решения этой проблемы формализованный аппарат метода анализа иерархий [1]. Основная проблема состоит

в декомпозиции КС ДЗЗ на более простые составляющие, т. е. в формировании последовательности суждений экспертов о приоритетности нормируемых характеристик с точки зрения их влияния на суммарную эффективность. Этот метод предполагает последующую обработку суждений экспертов путем вычисления частных и глобальных приоритетов. Для получения указанных векторов приоритетов строится множество матриц парных сравнений по каждой составляющей данного иерархического уровня и производится оценка векторов приоритетов с точки зрения степени их влияния на составляющие предшествующего уровня.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее ответственным этапом является построение иерархии суждений между первым и последним уровнями. Задача первого уровня заключается в формулировании цели, которая должна быть достигнута в результате получения информации ДЗЗ.

Система приоритетов в рассматриваемой задаче может быть представлена следующей иерархической системой критериев сравнения альтернативных вариантов КС ДЗЗ (рисунок). На нулевом уровне находится эффективность системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины». На первом уровне находятся основные отрасли — потребители космической информации ДЗЗ, которые обеспечивают эффективность выполнения главной задачи и должны быть оценены по отношению к критерию нулевого уровня. На втором уровне представлены тематические

Уровень 0 Эффективность системы "Космическая информация ДЗЗ – экономика и экобезопасность Украины"

Сферы деятельности

Уровень 1								
1.1 Сельское хозяйство	1.2 Экологический мониторинг	1.3 Поиск полезных ископаемых	1.4 Лесоводство	1.5 Геодезия и картография	1.6 Национальная безопасность	1.7 Водное хозяйство	1.8 Городское хозяйство	1.9 Космическая отрасль

Уровень 2 Тематические задачи различных сфер деятельности, при решении которых используется космическая информация ДЗЗ

2.1.1. Определение площадей сельхозкультур	2.1.2. Оценка ландшафтов Украины	2.1.3. Прогноз урожайности озимой пшеницы	2.1.4. Выявление растений, пораженных вредителями	2.1.5. Оценка содержания влаги в растениях	2.2.1. Оценка экологического состояния ландшафтов Украины	2.2.2. Оценка фитосанитарного состояния растительности	2.2.3. Оценка влияния радионуклидов и тяжелых металлов на растительность	2.3.1. Поиск полезных ископаемых	2.3.2. Поиск нефти и газа на шельфе	2.3.3. Поиск нефти и газа на суше	2.4.1. Определение видового состава лесов и его изменений во времени	2.4.2. Выявление участков леса, пораженных различными вредителями	2.4.3. Оценка пожарной опасности растительного покрова	2.5.1. Составление и обновление топографических карт	2.5.2. Картографирование изменений в топоситуации	2.5.3. Топографическая подготовка космических снимков	2.5.4. Составление планов населенных пунктов, промышленных объектов	2.6.1. Оценка масштабов подтопления и паводков	2.6.2. Контроль процессов эрозии и абразии берегов, селевых явлений	2.6.3. Выявление наливия радионуклидов и тяжелых металлов в растительности	2.7.1. Контроль экосостояния водных объектов	2.7.2. Определение зон "цветения"	2.7.3. Определение температуры водной поверхности	2.7.4. Определение размеров поверхности водоемов	2.8.1. Оценка влияния геодинамики на городские территории (ГТ)	2.8.2. Изменение ландшафтной структуры ГТ	2.8.3. Воздействие ГТ на изменение прилегающих ландшафтов	2.8.4. Подготовка данных ДЗЗ	2.9.1. Создание системы микроспутников	2.9.2. Создание распределенной сети и малых станций	2.9.3. Распространение информации ДЗЗ	2.9.4. Подготовка пользователей данных ДЗЗ
--	----------------------------------	---	---	--	---	--	--	----------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	--	---	--	--	---	---	---	--	---	--	--	-----------------------------------	---	--	--	---	---	------------------------------	--	---	---------------------------------------	--

Уровень 3 Группы показателей эффективности системы "Космическая информация ДЗЗ – экономика и экобезопасность Украины"

3.1. Характеристики изображений	3.2. Экономические критерии	3.3. Социальные критерии	3.4. Критерии обеспечения задач национальной безопасности	3.5. Экологические критерии	3.6. Критерии научно-технического развития
---------------------------------	-----------------------------	--------------------------	---	-----------------------------	--

Уровень 4 Показатели эффективности КС ДЗЗ по группам

Уровень 5 Варианты космических систем ДЗЗ

А. Космическая система типа Сич-1М В. Группировка микроспутников

Иерархическая система критериев сравнения альтернативных вариантов космических систем ДЗЗ. Составляющие группы показателей эффективности космических систем ДЗЗ (уровень 4) приведены в тексте

задачи различных сфер деятельности, при решении которых используется информация ДЗЗ. На третьем уровне находятся группы показателей эффективности космических систем ДЗЗ, по которым производится оценка выполнения задач рассматриваемых отраслей.

Составляющие каждой из групп показателей эффективности (уровень 3) образуют четвертый уровень иерархии, для которого мы для лучшей читаемости рисунка даем вербальное описание уровня. Так, для *характеристик* космических изображений основными являются пространственное разрешение, спектральное разрешение, частота просмотра, размер кадра на местности, оперативность поступления данных для обработки к потребителям, точность данных наблюдения поверхности Земли. Среди *экономических* критериев наиболее существенными являются объем увеличения продажи продукции, объем уменьшения производственных затрат, уменьшение затрат по сравнению с традиционными методами получения информации.

Важными являются *социальные* критерии, среди которых необходимо отметить степень влияния отрасли ДЗЗ на решение проблемы занятости населения, на повышение уровня квалификации потребителей, на повышение общего научного уровня общества и на развитие региональной инфраструктуры.

К *экологическим* критериям можно отнести меру использования данных ДЗЗ для фиксации изменений экосостояния окружающей среды, решение задач экологического мониторинга, улучшение экосостояния, степень решения проблем загрязнения окружающей среды.

Критериями *научно-технического* развития являются уровень выполненных разработок аппаратуры ДЗЗ, соответствие данных ДЗЗ требованиям пользователей, масштаб использования данных ДЗЗ, степень интеграции данных ДЗЗ в другие отрасли, степень достижения цели в проектах использованными методами.

Пятым уровнем являются варианты космических систем ДЗЗ, среди которых рассматриваются две альтернативы: «А» — космическая система из аппаратов типа «Сич-1М» и «В» — группировка микро-спутников.

Закон иерархической непрерывности требует, чтобы элементы нижнего уровня иерархии были сравнимы попарно по отношению к элементам следующего уровня, вплоть до вершины иерархии. При этом сопоставляемые варианты КС ДЗЗ должны оцениваться по совокупности своих «надсистемных» показателей.

Задача оценки эффективности КС ДЗЗ решается в два этапа: во-первых, создание единой бальной системы приоритетов экспертов и, во-вторых, полу-

чение в этой шкале количественных оценок показателей функционирования сопоставляемых вариантов КС ДЗЗ. Важным моментом является возможность лишь относительного сопоставления параметров альтернативных вариантов, т. е. сопоставления их не по ожидаемым абсолютным значениям, а по степени предпочтительности по каждому параметру.

На первом этапе может быть применена такая шкала относительной важности при парном сравнении характеристик [1]: 1 — равная важность характеристик, 3 — умеренное предпочтение одной характеристики другой, 5 — существенное превосходство, 7 — значительное превосходство, 9 — несопоставимое превосходство, 2, 4, 6, 8 — промежуточные решения.

На втором этапе, когда рассматриваемая проблема представлена иерархически, составляется матрица для сравнения влияния сфер деятельности первого уровня иерархии на нулевой уровень в соответствии с используемой шкалой предпочтений. Подобные матрицы должны быть построены для парных сравнений каждой альтернативы на втором уровне по отношению к общей цели на первом уровне и т. д. Клетки матриц заполняются оценками, суждениями эксперта или их группы об относительной важности сравниваемых отдельных элементов по отношению к цели или критерию, обозначенному на более высоком уровне, в соответствии с приведенной выше шкалой оценок.

Матрица парных сравнений имеет вид [2]:

$$\begin{array}{cccc} & A_1 & A_2 & \dots & A_n \\ A_1 & \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ A_2 & \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_n & \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{array}$$

где A_n — элементы, составляющие уровень, $\frac{w_a}{w_b}$ — отношение абсолютных приоритетов w_a, w_b .

Для удобства представления дальнейших рассуждений матрицы парных сравнений, которые всегда являются квадратными и обратно симметричными, запишем в виде

$$| | a_{ij} | |, \quad a_{ji} = 1/a_{ij},$$

где $i, j = 1, \dots, n$ — число критериев, сравниваемых на каждом уровне.

Далее вычисляются компоненты собственного вектора матрицы

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \left(\prod_{j=1}^n a_{1j} \right)^{1/n}, \\
 &\dots, \\
 a_n &= \left(\prod_{j=1}^n a_{nj} \right)^{1/n}.
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

Из полученных групп матриц определяются нормальные оценки вектора локальных приоритетов:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= a_1 / \sum a_i, \\
 &\dots, \\
 K_n &= a_n / \sum a_i.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

После того как компоненты собственного вектора получены для всех n строк матрицы в соответствии с выражениями (1), становится возможным их использование для дальнейших вычислений.

Одновременно с матрицей парных сравнений выполняется оценка степени отклонения от согласованности полученных локальных приоритетов путем вычисления индекса согласованности (ИС). Индекс согласованности в каждой матрице и для всей иерархии может быть приближенно вычислен по формуле

$$\text{ИС} = \left(\sum_{i=1}^n K_i \sum_{j=1}^n a_{ij} - n \right) / (n - 1). \quad (3)$$

Эта величина сравнивается с той, которая получилась бы при случайном выборе количественных суждений. Если разделить ИС на число, соответствующее случайной согласованности матрицы того же порядка, получим отношение согласованности (ОС).

Метод анализа иерархий позволяет сконструировать необходимую целевую функцию и оценить степень влияния на нее каждой из характеристик исследуемой системы. Если получены все необходимые весовые коэффициенты, то формула свертки обобщенного критерия для сравниваемых вариантов имеет вид

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s, \quad (4)$$

где верхний индекс критериального приоритета обозначает уровень иерархии, x_p^s — коэффициент предпочтительности варианта p по показателю s . Значения F позволяют установить предпочтительность того или иного альтернативного варианта системы по всей совокупности анализируемых факторов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод анализа иерархий был реализован в ЦАКИЗ ИГН НАН Украины в программной среде Microsoft Excel, с помощью которой были выполнены исследования эффективности системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины».

В качестве примера выбора варианта КС ДЗЗ были последовательно исследованы две упрощенные иерархические системы. Для первой системы в качестве сферы деятельности (уровень 1) были рассмотрены: лесоводство и городское хозяйство, а для второй — экологический мониторинг и национальная безопасность. Сопоставляя попарно альтернативы, эксперт задает систему предпочтений между элементами уровня, присваивая каждой из них определенный балл в шкале относительной значимости. В результате система предпочтений представляется квадратной матрицей размерностью 2×2 (табл. 1). Обработка матриц четырех уровней в соответствии с выражениями (1) и (2) дает возможность вычислить вектор приоритетов K^1 , K^2 , K^3 и K^4 соответствующих уровней (правый столбец таблиц), компоненты которого определяют их приоритеты с точки зрения эксперта. Для выполнения условий согласованности в матрицах попарных сравнений используются обратные величины $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

Ниже рассмотрим реализацию первой упрощенной системы «космическая информация ДЗЗ — экономика и экобезопасность Украины», включающей лесоводство и городское хозяйство. Построим матрицу для сравнения влияния сфер деятельности первого уровня иерархии на нулевой уровень (табл. 1). Обработка матрицы в соответствии с выражениями (1) и (2) дает возможность вычислить вектор приоритетов (правый столбец таблиц), компоненты которого определяют их вероятность с точки зрения эксперта.

Из тематических задач, обеспечивающих первый уровень, исследуем задачи: 2.4.1—2.4.3 и 2.9.1—2.9.3. Выполняя процедуру аналогично предыдущей, получим систему предпочтений, которая представляется двумя квадратными матрицами размерностью 3×3 (табл. 2 и 3).

Определив, таким образом, вектор приоритетов второго уровня, формируются векторы третьего уровня. В рассматриваемом примере для сокращения приводится только одна матрица размерностью 2×2 (из шести) для задачи определения видового состава лесов и его изменений во времени (табл. 4).

Построение шкалы балльных оценок завершается определением критериальных приоритетов X на уровне 4 (степень влияния параметров КС ДЗЗ на регистрацию информативных признаков тематиче-

Таблица 1. Матрица попарных сравнений 1-го уровня

Отрасли	Лесоводство	Городское хозяйство	K_i^1
Лесоводство	1	3	0.667
Городское хозяйство	1/3	1	0.333

Таблица 2. Матрица попарных сравнений 2-го уровня для лесоводства

№	2.4.1	2.4.2	2.4.3	K_m^2
2.4.1	1	1/5	1/7	0.075
2.4.2	5	1	1/2	0.333
2.4.3	7	2	1	0.592

Таблица 3. Матрица попарных сравнений 2-го уровня для городского хозяйства

№	2.9.1	2.9.2	2.9.3	K_m^2
2.9.1	1	1/5	1/2	0.117
2.9.2	5	1	4	0.683
2.9.3	2	1/4	1	0.2

Таблица 4. Матрица попарных сравнений 3-го уровня для задачи 2.4.1. Определение видового состава лесов

	3.1. Характеристики космических изображений	3.5. Экологические критерии	K_r^3
3.1. Характеристики космических изображений	1	3	0.667
3.5. Экологические критерии	1/3	1	0.333

ских задач). Эти оценки имеют значения, представленные в табл. 7.

Для всех матриц парных сравнений (табл. 1—6) были вычислены индекс согласованности и отношение согласованности, значения ОС приведены в табл. 8.

В случае, если ОС составляет не более 10—15 %, полученные значения K_i считаются достаточно согласованными, в противном случае эксперту следует тщательно проверить и уточнить назначенные им предпочтения.

Таким образом, получены все необходимые весовые коэффициенты для обобщенного критерия в виде свертки (4) для сравниваемых вариантов А и В в первой упрощенной системе. В обобщенном критерии F первый уровень соответствует принятию решения по всем векторам целевых приорите-

Таблица 5. Матрица попарных сравнений 4-го уровня для характеристик космических изображений

Характеристики космических изображений	4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5—1.1 мкм	4.1.2 ИК-диапазон спектра 10—12 мкм	4.1.3 Радиодиапазон	4.1.4 Пространственное разрешение	K_p^4
4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5—1.1 мкм	1	2	3	1/2	0.272
4.1.2 ИК-диапазон спектра 10—12 мкм	1/2	1	2	1/3	0.157
4.1.3 Радиодиапазон	1/3	1/2	1	1/5	0.088
4.1.4 Пространственное разрешение	2	3	5	1	0.483

Таблица 6. Матрица попарных сравнений 4-го уровня для экологических критериев

Экологические критерии	4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	K_p^4
4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	1	2	0.667
4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	1/2	1	0.333

Таблица 7. Таблица критериальных приоритетов X_p^S

	A	B
4.1.1 Видимый диапазон спектра 0.5—1.1 мкм	0.6	0.4
4.1.2 ИК-диапазон спектра 10—12 мкм	1	0
4.1.3 Радиодиапазон	1	0
4.1.4 Пространственное разрешение	0.3	0.7
4.5.1 Фиксация экосостояния по данным ДЗЗ	0.6	0.4
4.5.2 Решение задач экологического мониторинга	0.4	0.6

Примечание. А — КА типа Сич-1М, В — орбитальная группировка микроспутников.

тов, второй — вектору целевых приоритетов, третий — компонентам вектора целевых приоритетов и четвертый — компонентам вектора приоритетности показателей сравниваемых альтернатив. После получения на всех уровнях иерархии критериальных составляющих были определены количественные значения весовых коэффициентов параметров самого нижнего уровня в линейной целевой функции. На основании значений X_p^S (табл. 6) в соответствии с выражением (4) было рассчитано значение свертки F для каждого варианта КС. В результате получены следующие значения обоб-

Таблица 8. Значения отношения согласованности для матриц попарных сравнений

Матрица 1-го уровня	Матрица 2-го уровня (лесоводство, городское хозяйство)	Матрица 3-го уровня (задача 2.4.1, задача 2.4.2, задача 2.4.3, задача 2.9.1, задача 2.9.2, задача 2.9.3)	Матрица 4-го уровня (характеристики космических изображений, экологические критерии)
0.0	0.012 0.021	0.0	0.005 0.0

щенного критерия: $F_A = 0.54$ и $F_B = 0.46$.

Аналогичный вычислительный эксперимент был выполнен со второй упрощенной системой для сфер деятельности: экологический мониторинг и национальная безопасность — с использованием тех же вариантов *A* и *B*. После построения матриц попарных сравнений от первого до четвертого уровней и таблицы критериальных приоритетов по формуле (4) были получены следующие значения обобщенного критерия: $F_A = 0.40$ и $F_B = 0.59$.

Полученные значения обобщенного критерия двух экспериментов показывают, что для таких

сфер деятельности, как лесоводство и городское хозяйство по всей совокупности учитываемых факторов более эффективным будет вариант КА типа «Сич-1М», а для сфер деятельности национальная безопасность и экологический мониторинг — вариант КС ДЗЗ группировки микроспутников.

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993.—186 с.
2. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—252 с.
3. Федоровский А. Д., Якимчук В. Г., Козлов З. В., Колоколов А. А. Моделирование и оценка эффективности космических систем зондирования Земли // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 2/3.—С. 83—89.

EFFICIENCY EVALUATION OF REMOTE SENSING SPACE SYSTEMS BASED ON HIERARCHY ANALYSIS METHOD

A. D. Fedorovsky, V. G. Yakimchuk, H. N. Bodnar, Z. V. Kozlov

An efficiency evaluation procedure for remote sensing space systems using the hierarchy analysis method is substantiated. The possibility to choose a perspective variant of a space system for solution of remote sensing problems is shown by a comparison of one-spacecraft space systems with small spacecraft constellations.