



# ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.783

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ НА GEO, MEO И LEO ОРБИТАХ

### EVALUATION OF SATELLITE COMMUNICATIONS FOR GEO, MEO AND LEO ORBIT

Сидоренко И.А., Евтушенко М.А.  
Sidorenko I.A., Evtushenko M.A.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85  
Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

e-mail: 713634@bsu.edu.ru

*Аннотация.* В данной статье описана методика проведения сравнительной оценки эффективности систем спутниковой связи с ИСЗ на различных типах орбит. Методика разработана с использованием метода, основанного на применении условных критериев предпочтения с введением обобщенного показателя качества. Приводится пример сравнительной оценки эффективности систем спутниковой связи с ИСЗ на GEO, MEO и LEO орбитах.

*Resume.* This article describes the methodology of comparative assessment of the effectiveness of the systems of satellite communication with satellites in orbits of different types. The method developed using the method based on the use of conditional criteria preferences with the introduction of the generalized indicator of quality. An example of a comparative assessment of the effectiveness of systems of satellite communication with satellites in GEO, MEO and LEO orbits.

*Ключевые слова:* эффективность систем связи, системы спутниковой связи, GEO, MEO и LEO орбиты.  
*Keywords:* the effectiveness of communication systems, satellite communications, GEO, MEO and LEO orbits.

## Введение

Активное построение информационного общества обусловило быстрое развитие информационных технологий, сопровождающееся процессами глобализации и персонализации телекоммуникаций. Конечной целью этих процессов является построение глобальной инфокоммуникационной среды, обеспечивающей каждому пользователю свободный удаленный доступ к электронным ресурсам различного рода. Очевидно, что, не смотря на достигнутые успехи в построении различного рода проводных и беспроводных наземных систем передачи данных, полностью заявленные цели могут быть достигнуты только при использовании глобальных спутниковых систем связи (ССС).

Основными преимуществами СССР являются: большая зона покрытия, независимость от характера рельефа земной поверхности, возможность предоставления широкого спектра услуг. Существенным недостатком СССР является значительная стоимость ресурсов спутниковых каналов. Однако влияние этого фактора в ближайшей перспективе будет снижаться. Во-первых, плата за ресурсы может быть сравнима с затратами на построение наземных сетей для труднодоступных, отдаленных и малонаселенных участков территории. Во-вторых, стоимость ресурсов СССР не зависит от размеров территории и количества пользователей, и при привлечении большего количества пользователей удельные затраты могут оказаться ниже чем в системах, построенных на основе наземных каналов связи. Например, согласно прогнозам, приведенным в [1], в России в 2016 году запрос на услугу персональной связи посредством СССР будет удовлетворен только на 2,7%, а многофункциональная космическая система ретрансляции сможет обеспечить только 22% необходимой пропускной способности. В этих условиях вопросы прогнозирования путей развития СССР приобретают особую значимость и широко обсуждаются в научно-техническом сообществе [1-8].

Перечисленные факторы обуславливают необходимость аналитического обзора состояния и тенденций развития рынка инфокоммуникаций в целом и спутниковых телекоммуникаций в частно-



сти. Очевидно, что для этого необходимо располагать методическим инструментарием, позволяющим давать обоснованную оценку эффективности различных систем связи.

Оценка эффективности ССС не является сегодня тривиальной задачей, поскольку современные спутниковые системы используют различные типы орбит для ИСЗ и существенно отличаются по своим параметрам и характеристикам. В табл. 1 приведены основные параметры некоторых ССС, использующих различного рода орбиты ИСЗ: геостационарную (GEO), средневысотные (MEO) и низкие (LEO). Данные таблицы показывают существенное различие значений параметров у сравниваемых систем.

Таблица 1  
Table 1

**Параметры перспективных систем спутниковой связи**  
**Advanced Options satellite communication systems**

№ п/п	Исходные параметры и показатели	Величина параметра для системы		
		GEO (Inmarsat)	MEO (ICO)	LEO (Globalstar)
1	Задержка $t$ , мс	600	250	170
2	Пропускная способность системы $C$ , Гбит/с	3,3	2,8	3,97
3	Количество ИСЗ в созвездии $N$	8	12	48
4	Срок службы ИСЗ $T$ , лет	15	10	5
5	Ожидаемое количество обслуживаемых абонентов $A$ , млн.	3	2,3	5
6	Габариты $V$ , м <sup>3</sup>	20	14	9
7	Масса ИСЗ $G$ , т	4	2	0,5
8	Стоимость одного ИСЗ $Q$ , млн.дол.	180	100	13
9	Стоимость запуска ИСЗ $q$ , млн. дол.	150	50	6
10	Годовые эксплуатационные расходы $e$ , млн.дол.	75	135	227
11	Тариф $a$ , дол. мин	7	3	4

Анализ литературы и Интернет-ресурсов в области спутниковых систем связи [1-9] показывает, что в настоящее время отсутствует готовая методика оценки эффективности систем спутниковой связи, использующих GEO, LEO и MEO орбиты ИСЗ и предоставляющих различные услуги. В статье [3] предлагается методика оценки эффективности ССС с малыми ИСЗ на LEO, которая сводит оценку эффективности к расчету себестоимости единицы передачи информации. Однако предложенный подход не позволяет сравнить ССС с ИСЗ на GEO, LEO и MEO, параметры и предоставляемые услуги которых существенно отличаются. Поэтому, целью статьи является разработка и апробирование методики сравнительной оценки эффективности систем спутниковой связи, использующих ИСЗ на различных типах орбит.

### Объекты и методы исследования

Существующие методики оценки эффективности систем передачи данных основаны на математических или эвристических методах, а также их сочетании. Наиболее точные результаты дают математические методы отыскания наилучшей системы. Они сводятся к формированию совокупности исходных данных и критерия предпочтения, и отысканию чисто математическим путем наиболее эффективной системы, которая обладает лучшими параметрами. Теоретические основы для оценки эффективности различных систем связи известны давно, подробно рассмотрены в [10-17] и предполагают использование следующих 3-х совокупностей методов:

- методы, основанные на применении безусловного критерия предпочтения (БКП);
- методы, основанные на применении какого-либо из условных критериев предпочтения (УКП);
- комбинации методов, указанных выше.

Ко второй группе методов относятся:

- метод, основанный на введении результирующего показателя качества;
- минимаксный метод;
- метод с переводом всех показателей качества  $k_1, \dots, k_m$  за исключением одного, в разряд ограничений (типа равенств или неравенств);
- метод последовательных уступок;
- комбинированные методы, основанные на комбинации нескольких УКП.

В результате сравнительного анализа различных методов было принято решение использовать для оценки эффективности систем спутниковой связи метод, основанный на применении условных критериев предпочтения с введением обобщенного показателя качества.

Отметим две особенности выбранного метода:



1. При использовании УКП учитывается различие в относительной важности отдельных показателей качества  $k_1, \dots, k_m$  (путем выбора соответствующих значений весов  $c_1, \dots, c_m$  на основе экспертных оценок).

2. В ряде случаев вычислительные трудности оказываются меньшими.

На основе выбранного метода была разработана методика оценки эффективности систем спутниковой связи по ряду обобщенных показателей, с помощью которых сравниваемые системы ставились в равные условия. Центральным моментом методики оптимального выбора системы является формирование оценок эффективности анализируемых систем – целевых функций внешних и внутренних параметров систем и их сравнение между собой.

### Результаты и их обсуждение

Расчет обобщенных оценок эффективности ССС по предложенной методике может быть выполнен в следующей последовательности.

Используя данные табл. 1, вычислим обобщенные показатели рассматриваемых систем. Определяем коэффициент компактности:

$$v_i = V_i \times G_i \quad (1)$$

где  $V_i$  – габариты ИЗС;  $G_i$  – масса ИЗС

$$v_1 = V_1 \times G_1 = 20 \times 4 = 80 \text{ м}^3 \text{ т}$$

$$v_2 = V_2 \times G_2 = 14 \times 2 = 28 \text{ м}^3 \text{ т}$$

$$v_3 = V_3 \times G_3 = 9 \times 0.5 = 4.5 \text{ м}^3 \text{ т}$$

Находим удельный расход ИЗС за один год:

Из данных табл.1 видно, что ИЗС на геостационарной орбите за 15 лет будет 8; на средне-орбитальной за 10 лет – 12 ИЗС; на низкоорбитальной за 5 лет – 48 ИЗС. Значение под общим показателем возьмем  $l=30$  лет (т.к. 5, 10 и 15 лет, то коэффициент  $b_1=30/15=2$ ;  $b_2=30/10=3$ ;  $b_3=30/5=6$ ), чтобы вычислить удельный расход ИЗС за один год, необходимо:

$$\eta_i = \frac{N_i \times b_i}{l} \quad (2)$$

где  $N_i$  – количество ИЗС в созвездии;  $b_i$ –коэффициент работоспособности;  $l$  – общий показатель работоспособности на орбите

$$\eta_1 = \frac{N_1 \times b_1}{l} = \frac{8 \times 2}{30} = 0,53 \text{ (ИЗС/год)}$$

$$\eta_2 = \frac{N_2 \times b_2}{l} = \frac{12 \times 3}{30} = 1,2 \text{ (ИЗС/год)}$$

$$\eta_3 = \frac{N_3 \times b_3}{l} = \frac{48 \times 6}{30} = 9,6 \text{ (ИЗС/год)}$$

Вычислим коэффициент прибыльности при 100% загруженности трафика:

$$S_i = A_i \times a_i \quad (3)$$

где:  $A_i$ – ожидаемое количество обслуживаемых абонентов;  $a_i$ – тариф

$$S_1 = A_1 \times a_1 = 3 \times 7 = 21 \text{ млн.дол. / мин}$$

$$S_2 = A_2 \times a_2 = 2,3 \times 3 = 6,9 \text{ млн.дол. / мин}$$

$$S_3 = A_3 \times a_3 = 5 \times 4 = 20 \text{ млн.дол. / мин}$$

Суммарная стоимость проекта космического сегмента с учетом запуска и годового обслуживания:

$$W_i = Q_i \times N_i + q_i \times k_i + \varepsilon_i \times T \quad (4)$$

где  $Q_i$  – стоимость одного ИЗС;  $N_i$  – количество ИЗС в созвездии;  $q_i$ – стоимость запуска ИЗС;  $k_i$  – множитель количества запусков за 5 лет;  $\varepsilon_i$ – годовые эксплуатационные расходы;  $T$  – срок службы

$$W_1 = Q_1 \times N_1 + q_1 \times k_1 + \varepsilon_1 \times T = 180 \times 8 + 150 \times 2 + 75 \times 5 = 2115 \text{ млн.дол.}$$

$$W_2 = Q_2 \times N_2 + q_2 \times k_2 + \varepsilon_2 \times T = 100 \times 12 + 50 \times 3 + 135 \times 5 = 2025 \text{ млн.дол.}$$

$$W_3 = Q_3 \times N_3 + q_3 \times k_3 + \varepsilon_3 \times T = 13 \times 48 + 6 \times 12 + 227 \times 5 = 1831 \text{ млн.дол.}$$

Результаты расчета сведены в табл. 2. В последнем столбце таблицы помещены экстремальные данные по каждому обобщенному показателю сравниваемых технологий. Эти данные необходимы в дальнейшем для нормирования.



Таблица 2  
Table 2

**Результаты расчетов обобщенных показателей**  
**The results of calculations of general indicators**

№ п.п.	Обобщенные показатели	Величина показателя для системы			Экстремальные обобщенные показатели
		1	2	3	
1	Задержка $t$ , мс	600	250	170	170
2	Пропускная способность системы $C$ , Гбит/с	3,3	2,8	3,97	3,97
3	Коэффициент компактности $\nu$ , м <sup>3</sup> *Г	80	28	4,5	0,53
4	Удельный расход ИСЗ за 1 год $M$ , ИСЗ/год	0,53	1,2	9,6	4,5
5	Коэффициент прибыльности $S$ , млн.дол.в мин	21	6,9	20	21
6	Суммарная стоимость проекта $W$ , млн.дол.	2115	2025	1831	1831

Находим коэффициент успеха по обобщенным показателям систем.  
Для первого показателя получаем:

$$\eta_{ij} = \frac{X_i}{X_{\min}} \tag{5}$$

где  $X$  – показатель системы;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы

$$\eta_{11} = \frac{t_1}{t_{\min}} = \frac{600}{170} = 3,53$$

$$\eta_{12} = \frac{t_2}{t_{\min}} = \frac{250}{170} = 1,47$$

$$\eta_{13} = \frac{t_3}{t_{\min}} = \frac{170}{170} = 1$$

Для второго показателя:

$$\eta_{21} = \frac{C_1}{C_{\max}} = \frac{3,3}{3,97} = 0,83$$

$$\eta_{22} = \frac{C_2}{C_{\max}} = \frac{2,8}{3,97} = 0,71$$

$$\eta_{23} = \frac{C_3}{C_{\max}} = \frac{3,97}{3,97} = 1$$

Для третьего показателя:

$$\eta_{31} = \frac{M_1}{M_{\min}} = \frac{0,53}{0,53} = 1$$

$$\eta_{32} = \frac{M_2}{M_{\min}} = \frac{1,2}{0,53} = 2,26$$

$$\eta_{33} = \frac{M_3}{M_{\min}} = \frac{9,6}{0,53} = 18,1$$

Для четвертого показателя:

$$\eta_{41} = \frac{\nu_1}{\nu_{\min}} = \frac{80}{4,5} = 17,8$$

$$\eta_{42} = \frac{\nu_2}{\nu_{\min}} = \frac{28}{4,5} = 6,2$$

$$\eta_{43} = \frac{\nu_3}{\nu_{\min}} = \frac{4,5}{4,5} = 1$$

Для пятого показателя:

$$\eta_{51} = \frac{S_1}{S_{\max}} = \frac{21}{21} = 1$$

$$\eta_{52} = \frac{S_2}{S_{\max}} = \frac{6,9}{21} = 0,33$$

$$\eta_{53} = \frac{S_3}{S_{\max}} = \frac{20}{21} = 0,95$$

Для шестого показателя:

$$\eta_{61} = \frac{W_1}{W_{\min}} = \frac{2115}{1831} = 1,32$$



$$\eta_{62} = \frac{W_2}{W_{\min}} = \frac{2025}{1831} = 1,3$$

$$\eta_{63} = \frac{W_3}{W_{\min}} = \frac{1831}{1831} = 1$$

Определяем среднее арифметическое коэффициентов успеха  $\bar{\eta}_n$  по каждому обобщенному показателю технологий:  $\bar{\eta}_n = (\eta_{11} + \dots + \eta_{1m})$

$$\bar{\eta}_i = \frac{\sum \eta_{ij}}{x} \quad (6)$$

где  $\eta$  – коэффициент успеха;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы;  $x$  – количество систем

$$\bar{\eta}_1 = \frac{\eta_{11} + \eta_{12} + \eta_{13}}{3} = \frac{3,53 + 1,47 + 1}{3} = 2$$

$$\bar{\eta}_2 = \frac{\eta_{21} + \eta_{22} + \eta_{23}}{3} = \frac{0,83 + 0,71 + 1}{3} = 0,85$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{\eta_{31} + \eta_{32} + \eta_{33}}{3} = \frac{1 + 2,26 + 18,1}{3} = 7,12$$

$$\bar{\eta}_4 = \frac{\eta_{41} + \eta_{42} + \eta_{43}}{3} = \frac{17,8 + 6,2 + 1}{3} = 8,3$$

$$\bar{\eta}_5 = \frac{\eta_{51} + \eta_{52} + \eta_{53}}{3} = \frac{1 + 0,33 + 0,95}{3} = 0,76$$

$$\bar{\eta}_6 = \frac{\eta_{61} + \eta_{62} + \eta_{63}}{3} = \frac{1,32 + 1,3 + 1}{3} = 1,21$$

Находим усредненное значение абсолютных отклонений коэффициентов успеха  $\Delta\bar{\eta}$  от их среднего арифметического значения:

$$\Delta\bar{\eta}_i = \frac{\sum |\eta_{ij} - \bar{\eta}_i|}{x} \quad (7)$$

где:  $\eta$  – коэффициент успеха;  $\bar{\eta}_i$  – среднее арифметическое коэффициентов успеха;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы;  $x$  – количество систем

$$\Delta\bar{\eta}_1 = \frac{|\eta_{11} - \bar{\eta}_1| + \dots + |\eta_{13} - \bar{\eta}_1|}{3} = \frac{|3,53 - 2| + |1,47 - 2| + |1 - 2|}{3} = 1,02$$

$$\Delta\bar{\eta}_2 = \frac{|\eta_{21} - \bar{\eta}_2| + \dots + |\eta_{23} - \bar{\eta}_2|}{3} = 0,1$$

$$\Delta\bar{\eta}_3 = \frac{|\eta_{31} - \bar{\eta}_3| + \dots + |\eta_{33} - \bar{\eta}_3|}{3} = 7,32$$

$$\Delta\bar{\eta}_4 = \frac{|\eta_{41} - \bar{\eta}_4| + \dots + |\eta_{43} - \bar{\eta}_4|}{3} = 6,3$$

$$\Delta\bar{\eta}_5 = \frac{|\eta_{51} - \bar{\eta}_5| + \dots + |\eta_{53} - \bar{\eta}_5|}{3} = 0,29$$

$$\Delta\bar{\eta}_6 = \frac{|\eta_{61} - \bar{\eta}_6| + \dots + |\eta_{63} - \bar{\eta}_6|}{3} = 0,17$$

Вычисляем меру разброса  $D_{ni}$  для каждого обобщенного показателя  $i$  - й группы:

$$D_{ij} = \frac{\Delta\bar{\eta}_i}{\bar{\eta}_i} \quad (8)$$

где:  $\bar{\eta}_i$  – усредненное значение абсолютных отклонений коэффициентов успеха  $\bar{\eta}_i$  – среднее арифметическое коэффициентов успеха;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы.

$$D_{11} = \frac{\Delta\bar{\eta}_1}{\bar{\eta}_1} = \frac{1,02}{2} = 0,51$$



$$D_{21} = \frac{\Delta \bar{\eta}_2}{\bar{\eta}_2} = \frac{0,1}{0,85} = 0,12$$

$$D_{33} = \frac{\Delta \bar{\eta}_3}{\bar{\eta}_3} = \frac{7,32}{7,12} = 1,03$$

$$D_{43} = \frac{\Delta \bar{\eta}_4}{\bar{\eta}_4} = \frac{6,3}{8,3} = 0,76$$

$$D_{57} = \frac{\Delta \bar{\eta}_5}{\bar{\eta}_5} = \frac{0,29}{0,76} = 0,38$$

$$D_{62} = \frac{\Delta \bar{\eta}_6}{\bar{\eta}_6} = \frac{0,17}{1,21} = 0,14$$

Вычисляем сумму разброса  $D_i$  каждой группы обобщенных показателей:

$$D_i = D_j \tag{9}$$

где:  $D_j$  - мера разброса для каждого показателя  $i$  системы;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы

$$D_1 = D_{11} + D_{21} = 0,51 + 0,12 = 0,63$$

$$D_2 = D_{62} = 0,14$$

$$D_3 = D_{33} + D_{43} = 1,03 + 0,76 = 1,79$$

$$D_7 = D_{57} = 0,38$$

Таблица 3  
Table 3

**Расчетные показатели  $\bar{\eta}_n, \Delta \bar{\eta}_n, D_{ni}, D_i$   
Estimated  $\bar{\eta}_n, \Delta \bar{\eta}_n, D_{ni}, D_i$**

Номер группы параметров	Номер параметра	Расчетные величины параметров				
		$\bar{\eta}_n$	$\Delta \bar{\eta}_n$	$D_{ni}$	$D_i$	$\beta_i$
1	1	2	1,02	0,51	0,63	0,275
	2	0,85	0,1	0,12		
2	6	1,21	0,17	0,14	0,14	0,157
	3	7,12	7,32	1,03		
3	4	8,3	6,3	0,76	1,79	0,192
	5	0,76	0,29	0,38		
7	5	0,76	0,29	0,38	0,38	0,13

Полученные показатели  $\bar{\eta}_n, \Delta \bar{\eta}_n, D_{ni}, D_i$  заносим в соответствующие графы табл. 3. В эту же таблицу помещаем значения весовых коэффициентов  $\beta_i$  экспертного опроса, представленных в табл. 4 ниже. [4]

Таблица 4  
Table 4

**Весовые коэффициенты параметров  $\beta_i$   
Weightings parameters**

№ группы	Группы параметров	Параметры
		$\beta_i$
1	Информационная	0,275
2	Технико - экономическая	0,157
3	Технико - эксплуатационная	0,192
4	Аппаратурно - реализационная	0,121
5	Технических решений	0,107
6	Конструктивно - технологическая	0,148
7	Прочие	0,13

Определяем групповые коэффициенты успеха с учетом разброса обобщенных показателей.

$$q_{ij} = \frac{D_{ij} \eta_{ij} + D_j \eta_{ij}}{D_i} \tag{10}$$

где:  $D_i$  - сумма разброса каждой группы обобщенных показателей;  $D_j$  - мера разброса для каждого показателя  $i$  системы;  $i$  – порядковый номер системы;  $j$  – номер величины показателя системы



Для GEO орбиты:

$$q_{11} = \frac{D_{11}\eta_{11} + D_{21}\eta_{21}}{D_1} = \frac{0,51 \quad 3,53 + 0,12 \quad 0,83}{0,63} = 3,016$$

$$q_{12} = \frac{D_{62}\eta_{62}}{D_2} = \frac{0,14 \quad 1,32}{0,14} = 1,32$$

$$q_{13} = \frac{D_{33}\eta_{33} + D_{43}\eta_{43}}{D_3} = \frac{1,03 \quad 1 + 0,76 \quad 17,8}{1,79} = 8,133$$

$$q_{17} = \frac{D_{57}\eta_{57}}{D_7} = \frac{0,38 \quad 1}{0,38} = 1$$

Для МЕО орбиты:

$$q_{21} = \frac{D_{11}\eta_{12} + D_{21}\eta_{22}}{D_1} = \frac{0,51 \quad 1,47 + 0,12 \quad 0,71}{0,63} = 1,325$$

$$q_{22} = \frac{D_{62}\eta_{62}}{D_2} = \frac{0,14 \quad 1,3}{0,14} = 1,3$$

$$q_{23} = \frac{D_{33}\eta_{32} + D_{43}\eta_{42}}{D_3} = \frac{1,03 \quad 2,26 + 0,76 \quad 6,2}{1,79} = 3,933$$

$$q_{27} = \frac{D_{57}\eta_{52}}{D_7} = \frac{0,38 \quad 0,33}{0,38} = 0,33$$

Для LEO орбиты:

$$q_{31} = \frac{D_{11}\eta_{13} + D_{21}\eta_{23}}{D_1} = \frac{0,51 \quad 1 + 0,12 \quad 1}{0,63} = 1$$

$$q_{32} = \frac{D_{62}\eta_{63}}{D_2} = \frac{0,14 \quad 1}{0,14} = 1$$

$$q_{33} = \frac{D_{33}\eta_{33} + D_{43}\eta_{43}}{D_3} = \frac{1,03 \quad 18,1 + 0,76 \quad 1}{1,79} = 10,84$$

$$q_{37} = \frac{D_{57}\eta_{53}}{D_7} = \frac{0,38 \quad 0,95}{0,38} = 0,95$$

Находим оценки по группам показателей:

$$\gamma_j = q_j \beta_i \quad (11)$$

где  $\beta_i$  - параметр;  $q_j$  - групповые коэффициенты успеха;  $i$  - порядковый номер системы;  $j$  - номер величины показателя системы

Для GEO орбиты:

$$\gamma_{11} = q_{11}\beta_1 = 3,016 \quad 0,275 = 0,8294$$

$$\gamma_{12} = q_{12}\beta_2 = 1,32 \quad 0,157 = 0,21$$

$$\gamma_{13} = q_{13}\beta_3 = 8,133 \quad 0,192 = 1,56$$

$$\gamma_{17} = q_{17}\beta_7 = 1 \quad 0,13 = 0,13$$

Для МЕО орбиты:

$$\gamma_{21} = q_{21}\beta_1 = 1,325 \quad 0,275 = 0,364$$

$$\gamma_{22} = q_{22}\beta_2 = 1,3 \quad 0,157 = 0,204$$

$$\gamma_{23} = q_{23}\beta_3 = 3,933 \quad 0,192 = 0,755$$

$$\gamma_{27} = q_{27}\beta_7 = 0,33 \quad 0,13 = 0,043$$

Для LEO орбиты:

$$\gamma_{31} = q_{31}\beta_1 = 1 \quad 0,275 = 0,275$$

$$\gamma_{32} = q_{32}\beta_2 = 1 \quad 0,157 = 0,157$$

$$\gamma_{33} = q_{33}\beta_3 = 10,84 \quad 0,192 = 2,08$$

$$\gamma_{37} = q_{37}\beta_7 = 0,95 \quad 0,13 = 0,1235$$

Результаты оценок по группам показателей сведены в табл. 5.



Таблица 5  
Table 5

**Оценки по группам показателей**  
**Estimates for groups of indicators**

№ группы	Группы параметров	Величина параметра для технологии		
		1	2	3
1	2	3	4	5
1	Информационная	0,8294	0,364	0,275
2	Технико - экономическая	0,21	0,204	0,157
3	Технико - эксплуатационная	1,56	0,755	2,08
4	Аппаратурно - реализационная	-	-	-
5	Технических решений	-	-	-
6	Конструктивно - технологическая	-	-	-
7	Прочие	0,13	0,043	0,1235

Находим обобщенные оценки эффективности для каждой из сравниваемых систем спутниковой связи:

$$\gamma_i = \sum \gamma_{ij}$$

где  $\gamma_{ij}$  - оценка по группам показателей;  $i$  - порядковый номер системы;  $j$  - номер величины показателя системы

$$\gamma_1 = \gamma_{11} + \gamma_{12} + \dots + \gamma_{14} = 0,8294 + 0,21 + 1,56 + 0,13 = 2,7294$$

$$\gamma_2 = \gamma_{21} + \gamma_{22} + \dots + \gamma_{24} = 0,364 + 0,204 + 0,755 + 0,043 = 1,366$$

$$\gamma_3 = \gamma_{31} + \gamma_{32} + \dots + \gamma_{34} = 0,275 + 0,157 + 2,08 + 0,1235 = 2,6355$$

Результаты расчетов ССС приведены в виде столбчатой диаграммы на рис.1, где по оси ординат отложены обобщенные оценки эффективности, а по оси абсцисс – ССС по типу орбиты.

Из диаграммы видно, что по критериям обобщенной оценки эффективности лучшей является ССС с геостационарной орбитой. Это обусловлено превосходством данной технологии по первой и второй группам показателей при относительно высоких данных по третьей и седьмой группам (см. табл. 5). Не на много меньший показатель эффективности у ССС с ИСЗ на низкой орбите, которые на сегодняшний день активно эксплуатируются на равне с геостационарными ССС. Существенно уступает по обобщенному показателю эффективности ССС с ИСЗ на средневысотной орбите.

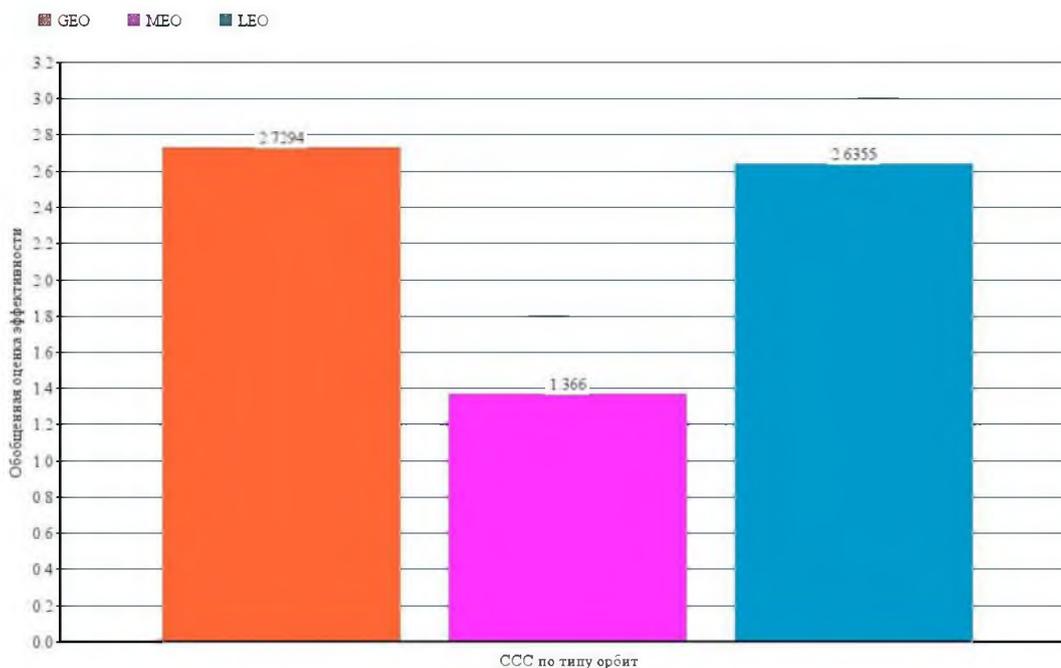


Рис.1. Результаты расчета эффективности ССС по типу орбит  
Fig. 1. The results of calculation of efficiency of CCC-type orbits



### Заключение

Полученные результаты оценки эффективности ССС совпадают с оценками и выводами экспертов, взятыми из открытых источников, что подтверждает корректность предлагаемой методики. Предложенная методика обладает гибкостью с точки зрения постановки задачи исследований, поэтому может быть широко использована на практике. Для более точной оценки может потребоваться дополнительное, более глубокое исследование с привлечением большего числа качественных показателей для групп 4, 5, 6 из табл.5 и экспертных оценок для выбора весовых коэффициентов.

Кроме этого, следует отметить и тот факт, что большинство ИСЗ предоставляют и некоммерческие услуги для государственных органов власти, различных министерств и ведомств. С учетом этого может существенно снизиться стоимость предоставляемых услуг населению, поскольку значительная часть затрат на изготовление ИСЗ, его запуск и поддержание на орбите, может быть перераспределена между коммерческой и некоммерческой сферами его применения.

Также практический интерес представляет и более тщательное исследование показателей, определяющих коммерческую выгоду. Обобщенный показатель «пропускная способность системы» слабо учитывает различные стратегии по предоставлению услуг. Он ни каким образом не позволяет судить о том, какие конкретно услуги и в каком объеме следует предоставлять потребителям, чтобы получить максимальную прибыль в рамках использования интегрального ресурса ССС – её пропускной способности.

### Список литературы References

1. Российская космонавтика. Что делать... Пресс-конференция Председателя НТС РосКосмоса Коптева Ю.Н. [Электронный ресурс]// URL: [https://youtu.be/CR7VKVU-Z\\_I](https://youtu.be/CR7VKVU-Z_I) (дата обращения: 10.09.2015)  
Rossijskaja kosmonavtika. Chto delat'... Press-konferencija Predsedatelja NTS RosKosmosa Kopteva Ju.N. [Jelektronnyj resurs]// URL: [https://youtu.be/CR7VKVU-Z\\_I](https://youtu.be/CR7VKVU-Z_I) (data obrashhenija: 10.09.2015)
2. Добров Г. М. Прогнозирование науки и техники.- М.: «Наука», 2014.- С. 208.  
Dobrov G. M. Prognozirovanie nauki i tehniki.- M.: «Nauka», 2014.- S. 208.
3. Валентин Анпилогов. 2015. Эффективность низкоорбитальных систем спутниковой связи на основе малых космических аппаратов.- Журнал «Технологии и средства связи», №4 2015.  
Valentin Anpilogov. 2015. Jeffektivnost' nizkoorbital'nyh sistem sputnikovoj svjazi na osnove malyh kosmicheskikh apparatov.- Zhurnal «Tehnologii i sredstva svjazi», №4 2015.
4. Экономическая эффективность и стимулирование создания и внедрения новой техники связи. Информ. Сб. М., «Связь», 2010.- С. 177  
Jekonomicheskaja jeffektivnost' i stimulirovanie sozdanija i vnedrenija novej tehniki svjazi. Inform. Sb. M., «Svjaz'», 2010.- S. 177
5. Справочники по спутниковой связи // [Персональная страница Л.Я. Невдяева] / [Новосибирск, 2003]. URL: <http://www.xserzer//231fd.htm> (дата обращения: 05.06.15).  
Spravochniki po sputnikovoj svjazi // [Personal'naja stranica L.Ja. Nevdjaeva] / [Novosibirsk, 2003]. URL: <http://www.xserzer//231fd.htm> (data obrashhenija: 05.06.15).
6. Официальный сайт российской компании Юниверс, которая специализируется в области систем спутниковой связи [Электронный ресурс]// URL:[http://www.univers-spb.ru/solution/wireless\\_networks/fso/](http://www.univers-spb.ru/solution/wireless_networks/fso/) (дата обращения: 12.05.2015)  
Oficial'nyj sajt rossijskoj kompanii Junivers, kotoraja specializiruetsja v oblasti sistem sputnikovoj svjazi [Jelektronnyj resurs]// URL:[http://www.univers-spb.ru/solution/wireless\\_networks/fso/](http://www.univers-spb.ru/solution/wireless_networks/fso/) (data obrashhenija: 12.05.2015)
7. Финансовый рынок телекоммуникаций [Электронный ресурс]// официальный сайт журнала «Connect! Мир Связи». URL: <http://www.connect.ru/article.asp?id=5082>(дата обращения: 27.05.2015)  
Finansovyy rynok telekommunikacij [Jelektronnyj resurs]// oficial'nyj sajt zhurnala «Connect! Mir Svjazi». URL: <http://www.connect.ru/article.asp?id=5082>(data obrashhenija: 27.05.2015)
8. Спутниковые системы связи [Электронный ресурс]// официальный сайт журнала «Теле-Спутник - 4(114) Апрель 2014 г». URL: <http://www.telesputnik.ru/archive/78/article/56.html> (дата обращения: 03.06.2015)  
Sputnikovye sistemy svjazi [Jelektronnyj resurs]// oficial'nyj sajt zhurnala «Tele-Sputnik - 4(114) Aprel' 2014 g». URL: <http://www.telesputnik.ru/archive/78/article/56.html> (data obrashhenija: 03.06.2015)
9. Спутниковая связь и вещание. Журнал «Технологии и средства связи». Специальный выпуск, 2015 год. [Электронный ресурс]// официальный сайт журнала «Технологии и средства связи» URL: <http://www.tssonline.ru/.html> (дата обращения: 13.06.2015)  
Sputnikovaja svjaz' i veshhanie. Zhurnal «Tehnologii i sredstva svjazi». Special'nyj vypusk, 2015 god. [Jelektronnyj resurs]// oficial'nyj sajt zhurnala «Tehnologii i sredstva svjazi» URL: <http://www.tssonline.ru/.html> (data obrashhenija: 13.06.2015)
10. Гуткин Л. С. Проблемы оптимизации радиосистем /Л.С. Гуткин.- М.: Радиотехника, 1970. - С. 21-29.:ил.  
Gutkin L. S. Problemy optimizacii radiosistem [Tekst]/L.S. Gutkin.- M.: Radiotehnika, 1970. - S. 21-29.:il.
11. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества/Л.С. Гуткин.- М.: Советское радио, 1975. - С. 12-368.:ил.



- Gutkin, L. S. Optimization of electronic devices on the basis of indicators of quality[Text]/L. S. Gutkin.- M.: Soviet radio, 1975. - S. 12-368.:Л.
12. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи.- М.: «Связь», 1976. - С. 97.
- Okunev Ju. B., Plotnikov V. G. Principy sistemnogo podhoda k proektirovaniju v tehnike svjazi.- M.: «Svjaz'», 1976. - S. 97.
13. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Оценки эффективности систем связи. – В кн.: «Современные методы и средства обработки сигналов», под ред. Заездного А. М., Л., ЛЭИС, 1971. - С. 95 – 101.
- Okunev Ju. B., Plotnikov V. G. Ocenki jeffektivnosti sistem svjazi. – V kn.: «Sovremennye metody i sredstva obrabotki signalov», pod red. Zaeznogo A. M., L., LJeIS, 1971. - S. 95 – 101.
14. Плотников В. Г. О выборе весовых коэффициентов по различным параметрам систем связи при их сравнении. – «Труды учебных институтов связи», Л., 1969, вып. 46.- С. 167 – 170.
- Plotnikov V. G. O vybore vesovyh koeficientov po razlichnym parametram sistem svjazi pri ih sravnenii. – «Trudy uchebnyh institutov svjazi», L., 1969, vup. 46.- S. 167 – 170.
15. Плотников В. Г. Сравнение конкретных систем связи на основе обобщенных количественных оценок.- М., «Труды учебных институтов связи», Л., 1970, вып. 51.- С. 3 – 13.
- Plotnikov V. G. Sravnenie konkretnyh sistem svjazi na osnove obobshhennyh kolichestvennyh ocenok.- M., «Trudy uchebnyh institutov svjazi», L., 1970, vup. 51.- S. 3 – 13.
16. Хазин Л. Н., Винник М. А. Показатели унификации. – «Стандарты и качество», 1968, № 2.- С. 15 – 17.
- Hazin L. N., Vinnik M. A. Pokazateli unifikacii. – «Standarty i kachestvo», 1968, № 2.- S. 15 – 17.
17. Невдяев Л.Я. Метод экспертных оценок в задаче сравнения систем связи. – «Труды НИИР», 2013, №3.- С. 153 – 156.
- Nevdjaev L.Ja. Metod jekspertnyh ocenok v zadache sravnenija sistem svjazi. – «Trudy NIIR», 2013, №3.- S. 153 – 156.