УДК 629.78

МЕТОДИКА ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ОБЛИКА ГЛОБАЛЬНОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ СБОРА ИЗМЕРЕНИЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Власов В.А.[1], Горбулин В.И.[1], Каргу Д.Л.[1], Паршин А.В.[1]

[1]ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия (197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13), vlasovsl@rambler.ru

Рассмотрены актуальные вопросы обоснования вариантов облика глобальной сети станций сбора измерений системы ГЛОНАСС. Обоснование глобальной сети станций сбора измерений основано на решении задачи комбинаторной оптимизации большой размерности. С целью уменьшения количества альтернативных решений предложена методика численного поиска локального экстремума в задаче комбинаторной геометрии о покрытии сферы кругами минимального радиуса, который соответствует размеру зоны радиовидимости станции. Полученные решения позволили сформировать варианты облика глобальной сети станций сбора измерений системы ГЛОНАСС, включающие приблизительный количественный состав сети станций сбора измерений, предпочтительные географические широты размещения станций и расстояния между местами их расположения. Представленные в статье рекомендации позволяют значительно сократить множество альтернатив на заключительном этапе обоснования облика глобальной сети станций сбора измерений системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС, сеть станций, станции сбора измерений, сферический многогранник, задача комбинаторной геометрии, задача о покрытии сферы, зона покрытия станции.

METHOD OF SELECTION OF OPTIONS APPEARANCE GLOBAL NETWORK STATIONS MEASUREMENT COLLECTION GLONASS

Vlasov V.A.[1], Gorbulin V.I.[1], Kargu D.L.[1], Parshin A.V.[1]

[1]Military Space academy n.a. A.F.Mozhaisky, Saint-Petersburg, Russia (197198, Saint-Petersburg, street Zhdanovskaya, 13), vlasovsl@rambler.ru

Pressing questions of justification options shape the global network of stations collecting measurements of the GLONASS system. Justification of the global network of stations collecting measurements based on the solution of combinatorial optimization problems of large dimension. In order to reduce the number of alternative solutions to the technique of numerical search local extremum problem in combinatorial geometry of circles covering a sphere of minimum radius which corresponds to the size of the zone of radio visibility station. The resulting solution allowed to form a global network of appearance options collection stations GLONASS measurements, including the approximate number of members of the network of stations collecting measurements, preferred geographical latitude location of the stations and the distance between the station location. Recommendations presented in the paper can significantly reduce the set of alternatives in the final stage appearance justify a global network of stations collecting measurements of the GLONASS system.

Keywords: Global navigation satellite system GLONASS network stations, collection of measurements, spherical polyhedron, the problem of combinatorial geometry, covering problem areas coverage station.

Одним из путей повышения точностных характеристик системы ГЛОНАСС считается создание глобальной сети станций сбора измерений (ССИ). Математическая постановка задачи развертывания этой сети и возможные пути решения задачи рассмотрены в [1]. Следует обратить внимание на ряд моментов. Как правило, ССИ должны располагаться в населенных пунктах с необходимой инфраструктурой или вблизи от них. Исключения могут составлять важные с географической точки зрения необитаемые районы Земного шара, например, в Антарктиде. Это обстоятельство предопределяет комбинаторный характер рассматриваемой оптимизационной задачи с большим количеством альтернативных решений. Например, если анализировать возможность размещения 20 станций в 100 населенных пунктах, то множество альтернатив будет включать в себя 10^{18} вариантов, полный перебор которых на современных персональных компьютерах потребует 170 миллионов лет.

В этих условиях необходимо на первых этапах проектирования оценить ориентировочный количественный состав сети ССИ и ее предпочтительную топологию (диапазон расстояний между ближайшими станциями, направления и т.д.). Такие оценки могут быть получены на основе решения задачи комбинаторной геометрии о покрытии сферы кругами минимального радиуса. Эта задача известна давно, и хотя ею занимались крупные математики (Л.Ф. Тот [4], Б.Л. Ван дер Варден, К. Шютте), она решена лишь для немногих частных случаев. То же относится и к родственной задаче о редчайшем расположении точек на сфере, которой интересовались еще Кеплер и Ньютон [3].

Точная нижняя оценка $\rho_{\text{покр}}$ размера зоны покрытия станции при заданном их количестве в системе может быть получена из решения задачи покрытия сферы кругами одинакового радиуса [2,3]. Ниже будет рассмотрен метод численного поиска локально-оптимального решения, а также некоторые вспомогательные задачи, которые используются при анализе многогранника, образованного точками расположения станций, для расчета показателей качества функционирования глобальной сети станций.

Имеется *K* кругов одинакового радиуса. Требуется найти на сфере такое расположение этих кругов, чтобы сфера была ими покрыта, а их радиус при этом был бы минимальным.

Пусть координаты центра *i*-го круга определяются двумя угловыми координатами $(\varphi_{\text{верш}\,i}, \lambda_{\text{верш}\,i}),\ i = 1,...,K$. Тогда целевая функция $\rho_{\text{покр}}(\varphi_{\text{верш}\,i}, \lambda_{\text{верш}\,i},..., \varphi_{\text{верш}\,K}, \lambda_{\text{верш}\,K})$ – необходимый размер зоны обзора при данном расположении центров кругов, определяемый парами $(\varphi_{\text{верш}1}, \lambda_{\text{верш}1}), (\varphi_{\text{верш}2}, \lambda_{\text{верш}2}),...,(\varphi_{\text{верш}\,K}, \lambda_{\text{верш}\,K})$, определится выражением:

$$\rho_{\text{покр}}(\varphi_{\text{верш}1}, \lambda_{\text{верш}1},..., \varphi_{\text{верш}\,K}, \lambda_{\text{верш}\,K}) = \max_{\varphi,\lambda} \min_{i \in 1,..,K} \rho_i(\varphi_1, \lambda_1,..., \varphi_i, \lambda_i),$$

где ρ_i – угловое расстояние от центра *i*-го круга до точки на сфере с координатами $(\varphi, \lambda),\ \varphi \in [-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}];\ \lambda \in [0, 2\pi)$.

Требуется определить координаты центров кругов, обеспечивающих минимальное значение целевой функции

$$(\varphi^*_{\text{верш}1}, \lambda^*_{\text{верш}1},..., \varphi_{\text{верш}\,K}, \lambda_{\text{верш}\,K}) = \arg \min_{(\varphi_{\text{верш}1}, \lambda_{\text{верш}1}),...,(\varphi_{\text{верш}\,K}, \lambda_{\text{верш}\,K})} \rho_{\text{покр}}(\varphi_1, \lambda_1,..., \varphi_K, \lambda_K)$$

В основе решения задачи лежат следующие три достаточно очевидных утверждения.

Если предварительно соединить все ближайшие центры кругов дугами большого круга, то в результате получается некоторый сферический многогранник, состоящий из сферических граней и сферических ребер. Если у обычного многогранника ребрами являются отрезки прямых, а гранями – треугольники или многоугольники, то у рассматриваемого сферического многогранника – части дуг и сферические треугольники или многоугольники соответственно. Понятно, что между размерами этих элементов существует простое геометрическое соотношение. Кроме того, очевидно, что объединение всех сферических граней образует сферу. Отсюда вытекают следующие утверждения.

Утверждение 1. Для того, чтобы сфера была покрыта *К* кругами, необходимо и достаточно, чтобы ими была покрыта каждая из граней многогранника.

Утверждение 2. Если радиус каждого из *К* кругов не уступает радиусу окружности, описанной вокруг грани многогранника, то эта грань будет покрыта данными кругами.

Здесь следует иметь в виду два случая:

а) центр описанной вокруг грани окружности принадлежит этой грани. Тогда сформулированное условие является необходимым и достаточным;

б) центр описанной вокруг грани окружности не принадлежит этой грани. Тогда для покрытия грани радиус окружности должен быть не менее половины большего из ребер, образующих данную грань, что несколько меньше, чем радиус описанной окружности. Однако это обстоятельство не имеет смысла учитывать, поскольку в этом случае покрытие центра описанной окружности должно быть учтено при рассмотрении смежной грани. А радиус соответствующей описанной окружности будет заведомо больше, чем исходной. Поэтому в дальнейшем, без ущерба для конечного результата, будем считать, что справедливо следующие утверждение.

Утверждение 3. Требуемый минимальный радиус каждого из *К* кругов определяется максимальным из радиусов окружностей, описанных вокруг каждой из граней:

$$\rho_{\text{покр}} = \max_{j \in J} \rho_{\text{покр}\, j}\,,$$

где J – множество граней многогранника из K вершин, j – номер грани.

Определение радиуса описанной вокруг грани окружности проводится следующим образом. Если грань является многоугольником (не треугольником), то ее можно представить в виде совокупности треугольников. Описанные вокруг них окружности совпадают и являются окружностью, описанной вокруг всей грани. Поэтому, не теряя общности, будем находить радиус окружности, описанной вокруг одного из треугольников, который либо является гранью, либо ее частью.

Из геометрических построений вытекает, что искомый радиус описанной вокруг j-й грани определяется выражением

$$r^2_{\text{окр}\,j} = R^2 - h_j^2\,;\; r_{\text{окр}\,j} = R\sin\rho_{\text{покр}\,j}\,;\; h_j = R\cos\rho_{\text{покр}\,j}\,,$$

где R=1 – радиус сферы, h_j – расстояние от центра сферы до j-й грани.

Отсюда следует, что максимум целевой функции $\rho_{\text{покр}\,j} = \arccos\left(\frac{h_j}{R}\right)$ достигается при минимуме функции h_j. Поэтому в дальнейшем будет исследована функция h_j, определяющая расстояние от центра сферы до каждой из граней.

Пусть уравнение плоскости, содержащей j-ю грань, в прямоугольной системе координат имеет вид

$$Ax + By + Cz + D = 0\,.$$

Здесь и далее индекс j опускается и считается, что номера вершин, участвующих в образовании j-й грани, равны 1, 2 и 3. Расстояние от центра сферы до грани определяется соотношением

$$h = D/\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}\,. \tag{1}$$

Из аналитической геометрии известно, что уравнение плоскости, проходящей через три точки, может быть представлено в виде

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0\,, \tag{2}$$

где координаты вершины определяются по формулам:

$$x = \cos\varphi\,\cos\lambda\,;\; y = \cos\varphi\,\sin\lambda\,;\; z = \sin\varphi\,,$$

где λ – угол, отсчитываемый против часовой стрелки в плоскости О$_{XY}$ от оси О$_X$ до плоскости, перпендикулярной О$_{XY}$ и содержащей одну из вершин, $\lambda \in [0, 2\pi)$; φ – угол, отсчитываемый в указанной плоскости против часовой стрелки от О$_{XY}$ до самой вершины.

Из выражения (2) можно получить

$$(x - x_1)\times\begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} - (y - y_1)\times\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} + (z - z_1)\times\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix} = 0$$

Отсюда коэффициенты уравнения плоскости определяются выражениями:

$$A = \begin{vmatrix} y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix};\; B = -\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix};\; C = \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{vmatrix};\; D = -Ax_1 - By_1 - Cz_1$$

Последние соотношения можно преобразовать к виду:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix};\; B = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix};\; C = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix};\; D = \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix}. \tag{3}$$

Метод варьирования положения центров кругов на сфере базируется на традиционной схеме методов синтеза: выбор начального приближения, затем итерационное изменение (варьирование) параметров оптимизации, последовательно улучшающее значение целевой функции до достижения требуемой точности. Одно из центральных мест в этом процессе принадлежит расчету производных и последующему их анализу. Поэтому требуется найти частные производные от целевой функции по начальному положению одного из центров кругов (для определенности – первого круга), воспользовавшись (1):

$$\frac{\partial h}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} = \left[\frac{\partial D}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} (A^2 + B^2 + C^2) - D \times \left(A \frac{\partial A}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} + B \frac{\partial B}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} + C \frac{\partial C}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} \right) \right] \times (A^2 + B^2 + C^2)^{-\frac{3}{2}};$$

(4)

$$\frac{\partial h}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} = \left[\frac{\partial D}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} (A^2 + B^2 + C^2) - D \times \left(A \frac{\partial A}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} + B \frac{\partial B}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} + C \frac{\partial C}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} \right) \right] \times (A^2 + B^2 + C^2)^{-\frac{3}{2}}.$$

Производные, входящие в правые части этих выражений, определятся соотношениями:

$$\frac{\partial A}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix}; \quad \frac{\partial A}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix};$$

$$\frac{\partial B}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix}; \quad \frac{\partial B}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ 0 & 1 & 1 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix};$$

$$\frac{\partial C}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \frac{\partial C}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix};$$

$$\frac{\partial D}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \lambda_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix}; \quad \frac{\partial D}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & x_2 & x_3 \\ \frac{\partial y_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & y_2 & y_3 \\ \frac{\partial z_1}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} & z_2 & z_3 \end{vmatrix}. \tag{5}$$

Найденные частные производные по соотношениям (4) с учетом (5) позволяют определять приращения расстояния от центра сферы до каждой из граней следующим образом:

$$\Delta h_j = \sum_{i=2}^{N} \left(\frac{\partial h_j}{\partial \lambda_{\text{верш } i}} \Delta\lambda_{\text{верш } i} + \frac{\partial h_j}{\partial \varphi_{\text{верш}1}} \Delta\varphi_{\text{верш } i} \right), \tag{6}$$

где j – номер грани; i – номер вершины, причем $i\neq1$, поскольку первая вершина принимается как базовая, ее положение совмещается с началом системы координат, т.е. $\lambda_{\text{верш}} \equiv 0$, $\varphi_{\text{верш}} \equiv 0$, и в дальнейшем эта вершина не смещается.

Частные производные $\partial h_j / \partial \lambda_{\text{верш } i}, \partial h_j / \partial \varphi_{\text{верш}1}$ вычисляются по соотношениям (4) и (5), если i -я вершина принадлежит j -й грани; в противном случае они принимаются равными нулю. Для численного поиска решения используется метод Ньютона.

В таблице 1 представлены параметры, характеризующие топологию многогранников, широты параллелей, на которых располагаются вершины каждого слоя, а также основные характеристики соответствующей сети станций: $\rho_{\text{покр}}$ – минимальный радиус кругов, который задает потребный размер зоны радиовидимости, а также δ – угол места, определяющий условия наблюдения космического аппарата (КА) над местным горизонтом. Структура многогранников, представленных в таблице 1, имеет определенную топологию:

– все K вершин (первый столбец таблицы), за исключением одной или двух, равномерно распределены вдоль m параллелей (слоев) по n в каждом слое;

– в каждом из полюсов может располагаться одна из вершин (второй столбец), таким образом количество вершин определяется соотношением $K=m*n+K_{\text{полюс}}$, где $K_{\text{полюс}}$ – количество вершин в полюсах (величина $K_{\text{ПОЛЮС}}$ может принимать значение 0, 1 и 2);

– все точки одного слоя вдоль параллели размещены равномерно, на угловом расстоянии $\Delta\varphi = 2\pi / n$ друг от друга;

– в очередном слое вершины смещены относительно предыдущего на угол $\Delta\varphi / 2$.

Анализ представленных результатов позволяет сделать ряд важных выводов:

1. В идеализированных условиях для однократного покрытия орбит КА системы ГЛОНАСС достаточно четырех станций, при этом угол наблюдения космических аппаратов

будет больше величины δ=5 °.

Таблица 1

Параметры многогранника глобальной сети станций сбора измерений

Количество вершин	Распределение вершин			$\rho_{покр}$, град	Широты параллелей (слоев)					δ, град
	Кол-во вершин в полюсах	Кол-во слоев	Кол-во в слое		1	2	3	4	5	
4	1	1	3	70,53	-19,47					5,08
8	-	2	4	49,93	40,06	-40,06				27,24
	1	1	7	61,70	-28,29					14,3
	2	2	3	53,13	26,57	-26,57				23,64
9	-	3	3	45,88	44,12	0	-44,12			31,86
	1	2	4	46,38	16,85	-43,62				31,3
10	-	3	3	45,88	44,12	0	-44,12			31,86
	1	2	4	46,38	16,85	-43,62				31,3
	-	2	5	48,03	41,97	-41,97				29,4
	2	2	4	42,31	24,47	-24,47				36,04
12	-	2	6	47,06	42,94	-42,94				30,5
	-	3	4	45	45	0	-45			32,88
	-	4	3	37,38	52,63	10,81	-10,81	-52,63		41,92
	2	2	5	37,38	26,57	-26,57				41,92
14	-	2	7	46,49	43,51	-43,51				31,18
	2	2	6	34,94	27,65	-27,65				44,86
	2	3	4	36,21	35,26	0	-35,26			43,3
	2	4	3	37,22	49,91	13,58	-13,58	-49,91		42,1
15	-	3	5	44,16	45,84	0	-45,84			33,88
	-	5	3	34,04	55,96	22,83	0	-22,83	-55,96	45,96
	1	2	7	39,03	17,71	-50,97				39,92
16	-	2	8	46,13	43,87	-43,87				31,6
	-	4	4	33,78	56,23	5,59	-5,59	-56,23		46,28
	2	2	7	33,55	28,29	-28,29				46,62
17	1	2	8	38,29	17,79	-51,71				40,82
	2	3	5	33,59	33,51	0	-33,51			46,52
	2	5	3	34,21	56,90	23,29	0	-23,29	-56,90	45,76
18	-	2	9	45,89	44,11	-44,11				31,86
	3	3		35,26	54,74	0	-54,74			44,48
	2	2	8	32,67	28,70	-28,70				47,64
	2	4	4	31,43	44,87	13,59	-13,59	-44,87		49,18
20	-	2	10	45,72	44,28	-44,28				32,06
	-	4	5	32,32	57,68	3,46	-3,46	-57,68		48,08
	-	5	4	30,76	59,25	27,55	0	-27,55	-59,25	50,0
	2	2	9	32,09	28,98	-28,98				48,36
	2	3	6	30,46	36,01	0	-36,01			50,38

2. Учет повышенных требований по точности измерений, возможного расположения станций в холмистой местности или вблизи высотных зданий приводит к необходимости расширения сети станций до 8-9 (при этом δ=25 °-30 °).

3. Невозможность расположения станций на территории океанов обуславливает необходимость расширения сети до 15-20 станций.

Анализ геометрических характеристик многогранников, представленных в таблице 1, с учетом их реализуемости с точки зрения географического фактора позволяет обосновать следующие рекомендации по размещению глобальной сети станций:

1. Наиболее предпочтительными географическими широтами расположения станций являются приэкваториальные (±6 ° и 20 °) и средние (56 °-59 °).

2. Расстояние между соседними станциями могут изменятся в пределах от пяти до семи тысяч километров.

Таким образом, предложенная методика позволяет обосновывать рекомендации по выбору облика глобальной сети ССИ системы ГЛОНАСС, включающие приблизительный количественный состав станций, предпочтительные географические широты размещения станций и расстояния между местами расположения станций. Эти рекомендации позволяют значительно сократить множество альтернатив на заключительном этапе обоснования облика глобальной сети станций сбора измерений системы ГЛОНАСС.

Список литературы

1. Власов В.А. Формализация задачи обоснования глобальной сети контроля целостности навигационного поля системы ГЛОНАСС // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1; URL http: www.science-education.ru / 121-18087 (дата обращения 24.03.2015).
2. Горбулин В.И. Новый способ орбитального построения глобальных спутниковых систем // Полет. – 2001. – № 12. – С. 20-26.
3. Горбулин В.И. Оптимизация орбитального построения глобальных космических систем наблюдения: учеб. пособие. – СПб.: МО РФ, 2001. – 172 с.
4. Тот Л.Ф. Расположение на плоскости, сфере и в пространстве. – М.:Физматгиз, 1958. – 363 с.
5. Янглом И.М. Проблема тринадцати шаров. – Киев: Высшая школа, 1975. – 85 с.

Рецензенты:

Петров Г.Д., д.т.н., профессор, начальник кафедры организации эксплуатации и технического обеспечения вооружения, военной и специальной техники ФГКВОУ ВПО

«Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.
Басыров А.Г., д.т.н., профессор, начальник кафедры информационно-вычислительных систем и сетей, ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.