

Оценивание неопределенности радиометрической калибровки оптической аппаратуры с использованием интегрирующей сферы

В. Р. ГАВРИЛОВ, Б. Б. ХЛЕВНОЙ, А. С. ПАНФИЛОВ, М. В. СОЛОДИЛОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: gavrilov@vniiofi.ru

Предложена процедура оценки неопределенности радиометрического интеграла, определяемого в процессе калибровки оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли с использованием интегрирующей сферы.

Ключевые слова: неопределенность измерения, радиометрическая калибровка, интегрирующая сфера, аппаратура наблюдения Земли.

The procedure of estimation of uncertainty of radiometric integral determined in the process of calibration of optical electronic Earth observation instruments with use of integrating sphere is proposed.

Key words: uncertainty of measurement, radiometric calibration, integrating sphere, Earth observation instruments.

В процессе практики наблюдений Земли из космоса в оптическом диапазоне длин волн пройден большой путь от использования визуальных методов и космической фотосъемки до применения современной оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли (АНЗ). В основном это видеоинформационная аппаратура для получения изображений наблюдаемых объектов, а также аппаратура для зондирования атмосферы [1].

Аппаратура наблюдения Земли, как правило, выполняет функции измерительных преобразователей — конструктивно обособленных технических средств с нормативными метрологическими характеристиками, служащих для преобразования измеряемой величины на входе в измерительные сигналы, которые передаются, обрабатываются, хранятся, подвергаются дальнейшим преобразованиям и индикации [2]. В зависимости от числа и ширины спектральных зон чувствительности можно выделить два типа АНЗ: многозональную — с относительно небольшим набором (в основном до 10) широких (более 10 нм) спектральных зон; гиперспектральную — с большим количеством (до нескольких тысяч) узких (не более 10 нм) спектральных зон. Примеры обоих типов АНЗ представлены в табл. 1, 2.

Окончание таблицы 1

Космический аппарат	Страна	Название АНЗ	Спектральные зоны, мкм
Spot 5	Франция	HRG	0,49—0,69 0,49—0,61 0,61—0,68 0,78—0,89 1,58—1,75
IRS-P6	Индия	LISS-III	0,52—0,59 0,62—0,68 0,77—0,86 1,55—1,75
Метеор-М № 1	Россия	МСУ-МР	0,50—0,70 0,70—1,10 1,60—1,80 3,50—4,10 10,50—11,50 11,50—12,50

Таблица 1

Спектральные характеристики многозональной АНЗ

Космический аппарат	Страна	Название АНЗ	Спектральные зоны, мкм
Landsat 7	США	ETM+	0,520—0,900 0,450—0,515 0,525—0,605 0,630—0,690 0,750—0,900 1,550—1,750 2,080—2,350 10,400—12,500

Таблица 2

Спектральные характеристики гиперспектральной АНЗ

Космический аппарат	Страна	Название АНЗ	Спектральные зоны	
			количество	диапазон, мкм
Envisat	ЕС	MERIS	15	0,40—1,05
Terra, Aqua	США	MODIS	36	0,41—14,50
EO-1	США	Hyperion	220	0,40—2,50
Aqua	США	AIRS	2382	0,41—15,40

Для *многозональной* АНЗ измеряемой величиной является эффективная энергетическая яркость наблюдаемого объекта

$$L_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} L_0(\lambda) S(\lambda) d\lambda,$$

где $L_0(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) объекта на длине волны λ ; $S(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность АНЗ.

При этом калибровочное уравнение имеет вид

$$L_{\text{эфф}} = i_0/k, \quad (1)$$

где i_0 — выходной сигнал АНЗ; k — коэффициент преобразования, в который входят максимальная абсолютная спектральная чувствительность ($S(\lambda)$ — результат ее нормировки по максимуму), а также независимые от длины волны параметры оптической системы и коэффициент усиления электронного тракта.

Измеряемая величина *гиперспектральной* АНЗ — СПЭЯ наблюдаемого объекта $L_0(\lambda)$, и калибровочное уравнение в этом случае имеет вид

$$L_0(\lambda) = i_0/K_\lambda,$$

где в K_λ по сравнению с k входит еще ширина спектральной зоны.

Возможные отклонения от линейности градуировочной характеристики АНЗ учитывают введением в (1) множителя $F_{\text{нл}}$; неравномерность чувствительности по полю зрения — введением множителя $F_{\text{нр}}$. Тогда с учетом темнового сигнала i_t выражение (1) запишем как

$$L_{\text{эфф}} = (i_0 - i_t) F_{\text{нл}} F_{\text{нр}} / k.$$

Для гиперспектральной АНЗ неидеальность радиометрических характеристик учитывают аналогично.

Операции по измерению функции $S(\lambda)$, величин k , $F_{\text{нл}}$, $F_{\text{нр}}$, i_t , а также отношения сигнал—шум на выходе АНЗ, светорассеяния и поляризационной чувствительности АНЗ определяют объем расширенной радиометрической калибровки [3—5]. В [5] дано описание указанных измерительных операций и оценены их неопределенности.

Настоящая работа посвящена детальному анализу неопределенности измерения коэффициента преобразования k в процессе радиометрической калибровки многозональной АНЗ. Предположим, что функция $S(\lambda)$ измерена в спектральном диапазоне Δ отдельной зоны чувствительности. При этом в качестве эталонного излучателя можно использовать монохроматический источник с известным относительным спектральным распределением мощности излучения. Измерение коэффициента k осуществляют при помощи эталонного источника излучения, в качестве которого широко применяют интегрирующие сферы (ИС) с известной СПЭЯ. В предположении, что ИС представляет собой протяженный однородный ламбертовский источник диффузного излучения, выходной сигнал АНЗ представим формулой [3]:

$$i = k \int_{\Delta} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $S(\lambda)$ — СПЭЯ ИС.

Из (2) следует, что относительная суммарная стандартная неопределенность измерения коэффициента k выражается формулой

$$\tilde{u}_c^2(k) \equiv u_c^2(k)/k^2 = \tilde{u}^2(i) + \tilde{u}^2(I), \quad (3)$$

которая содержит составляющие $\tilde{u}(i)$, определяемую выходным сигналом i , и $\tilde{u}(I)$, связанную с интегралом

$$I = \int_{\Delta} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Знак тильды использован для обозначения относительных неопределенностей. При достаточно высоких уровнях сигнала i в процессе калибровки определяющую роль в (3) играет второе слагаемое, поэтому задачей данной работы является оценивание стандартной неопределенности, ассоциированной с *радиометрическим интегралом* I (см. (4)).

Оценивание неопределенности интеграла. В области радио- и фотометрии представление выходной величины в виде интеграла по длинам волн некоторого спектрального распределения или произведения двух спектральных распределений вида (4) типично [6, 7]. Проблема учета неопределенностей измерений спектральных распределений при интегрировании по спектральному интервалу неоднократно рассматривалась в литературе, например [6—11], в том числе в общей постановке как задача оценки неопределенности интеграла

$$J = \int_a^b f(x) dx \quad (5)$$

от функции $f(x)$, значения которой $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$ в точках $x_1 \equiv a, x_2, \dots, x_n \equiv b$ являются результатом измерения. Выделим следующие основные подходы, применяемые к ее решению.

Первый подход [8] базируется на построении линейного среднего квадратического приближения интегрируемой функции $f(x) \approx \sum c_i P_i(x)$ [12] с последующим интегрирова-

нием найденного приближения $J \approx \sum c_i \int_a^b P_i(x) dx$. При этом

в качестве системы линейно независимых функций $P_i(x)$ обычно выбирают полиномы. Найденное приближенное выражение для J явно представляется через входные величины $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$, и его неопределенность вычисляется в соответствии с законом распространения неопределенности [13]. Однако, по утверждению авторов [8], в случае ненулевых корреляций входных величин, т. е. $\text{cov}(f(x_i), f(x_j)) \neq 0$, реализация этой процедуры требует гигантских вычислительных мощностей, что послужило поводом для авторов [9] использовать второй подход, основанный на методе Монте-Карло.

Третий подход к оценке неопределенности интеграла (5) предложен в [10] и основан на применении квадратурной формулы

$$J \approx \sum_{i=1}^n w_i f(x_i), \quad (6)$$

полученной в результате полиномиальной интерполяции подынтегральной функции по известным точкам $(x_1, f(x_1)), \dots, (x_n, f(x_n))$ и последующего интегрирования [12]. Заметим, что веса w_j в (6) не зависят от входных величин $f(x_j)$, а определяются только узлами интерполяции x_j . Например, если узлы распределены равномерно с шагом $h = (b - a)/(n - 1)$, то для формулы трапеций, возникающей при интерполяции полиномами 1-го порядка, веса принимают значения $w_2 = \dots = w_{n-1} = h$, $w_1 = w_n = h/2$.

Если формула (6) достаточно точно приближает интеграл J (см. (5)), то ее можно рассматривать как математическую модель измерений с входными величинами $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$. Тогда в соответствии с законом распространения неопределенности [13] суммарную стандартную неопределенность интеграла (5) представим в виде

$$u_c^2(J) = \sum_{m=1}^n w_m^2 \bar{f}_m^2 \tilde{u}^2(f(x_m)) + \sum_{i \neq j} w_i w_j u(f(x_i), f(x_j)),$$

где $\bar{f}_m, \tilde{u}^2(f(x_m))$ — входная оценка и оцененная дисперсия $f(x_m)$, соответственно; $u(f(x_i), f(x_j))$ — оцененная ковариация $f(x_i)$ и $f(x_j)$.

При этом выходную оценку интеграла (5) выразим как

$$\bar{J} = \sum_{i=1}^n w_i \bar{f}_i.$$

Следуя этому подходу для оценки неопределенности радиометрического интеграла (4), предположим, что $L(\lambda), S(\lambda)$ измерены на длинах волн $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ в спектральной зоне чувствительности $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_n]$, и полученные результаты дают достаточно полную информацию о поведении указанных функций, так что методическая погрешность квадратурной формулы

$$I \approx \sum_{m=1}^n w_m L(\lambda_m) S(\lambda_m) \quad (7)$$

будет значительно ниже измерительной при оценке значения интеграла (4). Тогда (7) можно рассматривать как математическую модель измерения интеграла (4), и в соответствии с этой моделью выходная оценка интеграла и его суммарная стандартная неопределенность примут вид

$$I = \sum_{m=1}^n w_m \bar{L}_m \bar{S}_m, \quad (8)$$

$$u_c^2(I) = \sum_{m=1}^n w_m^2 \bar{L}_m^2 \bar{S}_m^2 \times$$

$$\times \left\{ \tilde{u}_c^2(S(\lambda_m)) + \tilde{u}_c^2(L(\lambda_m)) + \tilde{u}_c^2(L(\lambda_m)) \tilde{u}_c^2(S(\lambda_m)) \right\} + \quad (9)$$

$$+ \sum_{i \neq j} w_i w_j \left\{ \bar{L}_i \bar{L}_j u[S(\lambda_i), S(\lambda_j)] + \bar{S}_i \bar{S}_j u[L(\lambda_i), L(\lambda_j)] + \right.$$

$$\left. + u[L(\lambda_i), L(\lambda_j)] u[S(\lambda_i), S(\lambda_j)] \right\},$$

где $\bar{L}_m, \bar{S}_m$ и $\tilde{u}_c(L(\lambda_m)), \tilde{u}_c(S(\lambda_m))$ — входные оценки и оцененные относительные стандартные отклонения $L(\lambda_m), S(\lambda_m)$, соответственно, $m = 1, \dots, n$; $u[L(\lambda_i), L(\lambda_j)], u[S(\lambda_i), S(\lambda_j)]$ — оцененные ковариации, $i, j = 1, \dots, n$.

Формулы (8), (9) получены при условии, что случайные величины $L(\lambda_i), S(\lambda_j)$ независимы $\forall i, j = 1, \dots, n$, поскольку определяются в результате различных независимых измерений. Заметим, что последние слагаемые в каждой паре фигурных скобок могут быть отброшены ввиду их малости по сравнению с другими слагаемыми.

Оценка неопределенности интеграла (4) по (9) требует учета корреляций между величинами $L(\lambda_i), L(\lambda_j)$ и $S(\lambda_i), S(\lambda_j)$, измеренными на различных длинах волн. Причины возникновения корреляций между величинами спектрального распределения, соответствующими различным длинам волн, неоднократно обсуждались в литературе, например в [11]. Рассмотрим модель для описания подобных корреляций, использованную в данной работе. Представим СПЭЯ ИС на длине волны λ_m следующим образом:

$$L(\lambda_m) = \bar{L}_m (1 + L_m^r + L_m^s), \quad m = 1, \dots, n, \quad (10)$$

где случайные величины L_m^r, L_m^s имеют нулевое математическое ожидание и описывают соответственно случайный эффект изменения величины $L(\lambda_m)$ и систематический эффект при ее измерении; L_m^r, L_m^s предполагаются независимыми.

Из (10) следует соотношение

$$\tilde{u}_c^2(L(\lambda_m)) \equiv \tilde{u}_c^2(L(\lambda_m)) / \bar{L}_m^2 = u^2(L_m^r) + u^2(L_m^s). \quad (11)$$

В дальнейшем примем, что стандартное отклонение $u(L_m^r)$ величины L_m^r совпадает с относительной стандартной неопределенностью измерения $L(\lambda_m)$, оцененной по типу А, а стандартное отклонение $u(L_m^s)$ величины L_m^s — с относительной стандартной неопределенностью измерения $L(\lambda_m)$, оцененной по типу В, т. е.

$$u(L_m^r) = \tilde{u}_A(L(\lambda_m)); u(L_m^s) = \tilde{u}_B(L(\lambda_m)). \quad (12)$$

Кроме того, предполагается, что ненулевую корреляцию имеют только пары величин, описывающие систематический эффект на различных длинах волн:

$$\text{cov}(L_i^r, L_j^r) = 0, \text{cov}(L_i^s, L_j^s) \neq 0, i \neq j; \quad (13)$$

$$\text{cov}(L_i^r, L_j^s) = 0, \forall i, j.$$

В полной аналогии с (11) представим относительную спектральную чувствительность АНЗ как

$$S(\lambda_m) = \bar{S}_m (1 + S_m^r + S_m^s), \quad m = 1, \dots, n.$$

Таблица 3

Спектральные характеристики оптико-электронной аппаратуры РДСА и ИС

λ_k , нм	$\bar{S}_k$	$\tilde{u}_A(S(\lambda_k))$, %	$\tilde{u}_B(S(\lambda_k))$, %	$\tilde{u}_C(S(\lambda_k))$, %	$\bar{L}_k^{\text{отн}}$	$\tilde{u}_A(L(\lambda_k))$, %	$\tilde{u}_B(L(\lambda_k))$, %	$\tilde{u}_C(L(\lambda_k))$, %
1-я зона спектральной чувствительности 510—600 нм								
510	0,02	9,88	0,34	9,89	0,54	0,30	0,64	0,71
520	0,05	4,34	0,34	4,36	0,59	0,29	0,63	0,69
530	0,58	0,76	0,34	0,83	0,65	0,28	0,62	0,68
540	0,79	0,47	0,34	0,58	0,71	0,27	0,61	0,66
550	0,94	0,35	0,34	0,49	0,76	0,26	0,60	0,65
560	0,98	0,31	0,35	0,47	0,81	0,24	0,59	0,64
570	0,77	0,42	0,36	0,55	0,86	0,23	0,58	0,62
580	0,89	0,33	0,37	0,49	0,91	0,22	0,56	0,61
590	0,17	1,66	0,35	1,70	0,96	0,21	0,55	0,59
600	0,01	8,83	0,34	8,84	1,00	0,20	0,54	0,58
2-я зона спектральной чувствительности 610—690 нм								
610	0,01	9,73	0,34	9,74	0,79	0,20	0,54	0,57
620	0,13	1,97	0,34	2,00	0,82	0,20	0,54	0,57
630	0,79	0,43	0,34	0,55	0,85	0,20	0,54	0,57
640	0,94	0,35	0,34	0,49	0,88	0,20	0,53	0,57
650	0,99	0,32	0,34	0,47	0,90	0,20	0,53	0,57
660	0,94	0,36	0,35	0,50	0,93	0,20	0,53	0,57
670	0,60	0,64	0,36	0,73	0,96	0,20	0,53	0,57
680	0,06	3,49	0,37	3,51	0,98	0,20	0,53	0,57
690	0,01	9,92	0,35	9,93	1,00	0,20	0,53	0,57
3-я зона спектральной чувствительности 760—910 нм								
760	0,01	9,78	0,36	9,79	0,94	0,20	0,54	0,58
770	0,06	3,21	0,36	3,23	0,95	0,20	0,53	0,57
780	0,39	0,96	0,35	1,02	0,96	0,20	0,53	0,57
790	0,77	0,54	0,35	0,64	0,97	0,20	0,52	0,56
800	0,93	0,47	0,35	0,59	0,98	0,20	0,52	0,56
810	0,99	0,39	0,35	0,53	0,98	0,20	0,52	0,56
820	0,97	0,36	0,35	0,51	0,99	0,20	0,52	0,56
830	0,95	0,36	0,37	0,52	0,99	0,20	0,52	0,56
840	0,97	0,34	0,39	0,52	0,99	0,20	0,52	0,56
850	0,97	0,33	0,37	0,49	0,99	0,20	0,52	0,56
860	0,88	0,36	0,35	0,50	0,99	0,20	0,52	0,56
870	0,87	0,31	0,36	0,48	1,00	0,20	0,52	0,56
880	0,65	0,41	0,37	0,55	0,99	0,20	0,51	0,55
890	0,22	1,06	0,38	1,13	0,99	0,21	0,51	0,55
900	0,05	2,89	0,39	2,92	0,99	0,22	0,51	0,56
910	0,01	6,86	0,41	6,87	0,98	0,22	0,51	0,56

В отношении S_m^r, S_m^s применяется такая же трактовка и свойства, приводящие к соотношениям, полностью аналогичным (11)—(13). При сделанных предположениях ковариации в (9) принимают вид

$$u(L(\lambda_i), L(\lambda_j)) = \bar{L}_i \bar{L}_j \tilde{u}_B(L(\lambda_i)) \tilde{u}_B(L(\lambda_j)) r(L_i^s, L_j^s); \quad (14)$$

$$u(S(\lambda_i), S(\lambda_j)) = \bar{S}_i \bar{S}_j \tilde{u}_B(S(\lambda_i)) \tilde{u}_B(S(\lambda_j)) r(S_i^s, S_j^s),$$

где $r(L_i^s, L_j^s), r(S_i^s, S_j^s)$ — оцененные коэффициенты корреляции величин, описывающих систематические эффекты.

Пример оценки неопределенности. Рассмотрим оценку неопределенности интеграла (4) с использованием данных по ИС и монохроматическому излучателю, входящим в состав радиометрического комплекса ВНИИОФИ (ГЭТ 179—2010)

[14, 15], и многозональной оптико-электронной съемочной аппаратуры распределенного доступа (РДСА), разработанной Красногорским заводом им. С. А. Зверева и НПП «Оптэкс» для космического аппарата «Монитор-Э» [16]. Результаты измерений $S(\lambda)$ РДСА для трех зон чувствительности, а также их относительные стандартные неопределенности, представлены в табл. 3 с шагом 10 нм по длине волны, там же для каждой из зон приведена относительная СПЭЯ ИС $\bar{L}_k^{\text{отн}}$ и относительные стандартные неопределенности этих измерений.

Используя данные табл. 3, вычисляем по (9) оценку относительной суммарной стандартной неопределенности радиометрического интеграла (4). При этом ковариации $u(L(\lambda_i), L(\lambda_j))$ и $u(S(\lambda_i), S(\lambda_j))$ оценим согласно (14), рассмотрев два предельных случая. В первом случае предположим, что

$r(L_i^s, L_j^s), r(S_i^s, S_j^s)$ равны нулю, т. е. между спектральными

измерениями на разных длинах волн как в случае СПЭЯ, так и в случае относительной спектральной чувствительности, полностью отсутствует корреляция. Во втором случае предположим, что $r(L_j^s, L_j^s) = r(S_j^s, S_j^s) = 0,99$, т. е. имеется сильная положительная корреляция случайных величин, описывающих систематические эффекты. Результаты вычислений для каждой из трех зон чувствительности РДСА в обоих случаях приведены в табл. 4.

Таблица 4

Относительная суммарная стандартная неопределенность интеграла (4)

Зона чувствительности	$\tilde{u}_c(I)$, %, при различной корреляции	
	нулевой	сильной положительной
1	0,34	0,71
2	0,35	0,67
3	0,23	0,64

Заключение. Дано описание процедуры оценки неопределенности радиометрического интеграла (4), возникающего при определении коэффициента преобразования k в (2) в процессе радиометрической калибровки оптико-электронной АНЗ с использованием ИС в качестве эталонного излучателя. Процедура применима также и для других интегралов вида (4), часто встречающихся в радио- и фотометрии при определении выходного излучения приемника. Рассмотренный пример, результаты которого представлены в табл. 4, свидетельствует о необходимости точного учета корреляции спектральных измерений на различных длинах волн, что может быть сделано, например, статистическим оцениванием коэффициентов корреляции. Это распространяется как на измерение спектральных характеристик эталонного излучателя, так и на измерение характеристик спектральной чувствительности оптико-электронной АНЗ.

Работа выполнена с использованием измерительного оборудования ВНИИОФИ (уникальной установки, стенда — УСУ) при поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 14.518.11.7050).

Литература

1. **Earth** Observation Handbook — Climate Change. Noordwijk (Netherlands): ESTEC, 2008.

2. **PMG 29—99.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

3. **Wyatt C. L., Privalsky V. E., Datla R.** Recommended Practice; Symbols, Terms, Units and Uncertainty Analysis for Radiometric Sensor Calibration. NIST Handbook 152, 1998.

4. **Панфилов А. С.** Метрологические аспекты измерений оптических характеристик системы «поверхность Земли—атмосфера» по результатам съемки из космоса // Исследование Земли из космоса. 2002. № 5. С.15—21.

5. **Панфилов А. С., Глазкова И. А.** Оценка точности предполетной радиометрической калибровки оптико-электронной съемочной аппаратуры видимого и ближнего ИК-диапазонов длин волн // Исследование Земли из космоса. 2003. № 5. С. 43—50.

6. **Tsai B. K., Johnson B. C.** Evaluation of uncertainties in fundamental radiometric measurements // Metrologia. 1998. V. 35. N 4. P. 587—593.

7. **Gardner J. L.** NMI TR 9 Uncertainties in Photometric Integrals. Australian Government National Measurement Institute. First ed. Nov. 2005. [Официальный сайт]. [http://www.measurement.gov.au/Publications/TechnicalReports/Documents/NMI TR 9.doc](http://www.measurement.gov.au/Publications/TechnicalReports/Documents/NMI_TR_9.doc) (дата обращения 13.07.2013 г.).

8. **Cordero R. R., Roth P.** On two methods to evaluate the uncertainty of derivatives calculated from polynomials fitted to experimental data // Metrologia. 2005. V. 42. N 1. P. 39—44.

9. **Cordero R. R. и др.** Uncertainty of experimental integrals: application to the UV index calculation // Metrologia. 2008. V. 45. N 1. P. 1—10.

10. **Cox M. G.** The area under a curve specified by measured values Metrologia // Metrologia. 2007. V 44. N 5. P. 365—378.

11. **Gardner J. L.** Correlations in primary spectral standards // Metrologia. 2003. V. 40. N 1. P. S167—S171.

12. **Калиткин Н. Н.** Численные методы. М.: Наука, 1978.

13. **JCGM 100:2008.** Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).

14. **Саприцкий В. И. и др.** Метрологическое обеспечение радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения Земли // Мир измерений. 2011. № 12. С. 14—20.

15. **Sapritsky V. I. и др.** Current activity of Russia in measurement assurance of Earth optical observation // Metrologia. 2012. V. 49. N 2. P. S9—S16.

16. **Глазкова И. А. и др.** Малый космический аппарат ДЗЗ «Монитор-Э» и дальнейшее развитие аппаратов этого типа // Труды IV Междунар. конф.-выставки «Малые спутники. Новые технологии, миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Королев, 2004. Кн. 1. С. 245—253.

Дата принятия 13.09.2012 г.