

**Доленко Юрий Сергеевич** – e-mail: dolenko.yury@gmail.com; кафедра вычислительной техники; специалист; аспирант.

**Бутов Павел Александрович** – e-mail: pbootoff@gmail.com; кафедра вычислительной техники; специалист; аспирант.

**Chernukhin Yuri Victorovich** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: chernukhin@dce.tsure.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Dolenko Yuri Sergeevich** – e-mail: dolenko.yury@gmail.com; the department of computer engineering; specialist; postgraduate student.

**Butov Pavel Aleksandrovich** – e-mail: pbootoff@gmail.com; the department of computer engineering; specialist; postgraduate student.

УДК 621.391

**С.В. Кравцов**

**МЕТОДЫ УЧЕТА РАССОГЛАСОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ СТЕРЕОЗРЕНИЯ В ИЗМЕРЕНИЯХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДАЕМОЙ СЦЕНЫ**

*Актуальной является задача повышения точности измерений цифровой системы стереозрения при наличии рассогласований её параметров. В качестве цифровой системы стереозрения анализируется система из двух сонаправленных цифровых видеокамер.*

*Рассматриваются методы учета рассогласований параметров цифровой системы стереозрения в измерениях точечных объектов наблюдаемой сцены. Приводятся результаты экспериментов по учету в измерениях точечных объектов наблюдаемой сцены рассогласований параметров цифровой системы стереозрения. При учете оценок рассогласований в измерениях рассогласованной цифровой системы стереозрения достигается приемлемое качество измерений. Методы учета рассогласований параметров могут применяться для повышения точности измерений цифровой системы стереозрения при наличии рассогласований её параметров.*

*Стереозрение; ошибки измерений.*

**S.V. Kravtsov**

**METHODS OF THE ACCOUNT OF DIGITAL STEREOVISION SYSTEM MISMATCHES IN OBSERVABLE SCENE POINT OBJECTS MEASUREMENTS**

*Is actual the task of improving the measurement accuracy of digital stereovision system in the presence of mismatches of parameters. As a digital system is analyzed stereovision system of two collinear digital cameras.*

*Consider methods of digital stereovision system mismatches accounting in measurements point objects observed scene. Results of experiments under the account in measurements of an observable scene dot objects of digital stereovision system parameters mismatches are resulted. Разрешить написание латиницей. When taking into account estimates of mismatches in measurements mismatched digital stereovision system achieved an acceptable quality of the measurements. The methods can be used to enhance the accuracy of digital stereovision system in the presence of mismatches of parameters.*

*Stereovision; measurement error.*

Анализируется задача повышения точности измерений в цифровой бинокулярной системе технического зрения (БСТЗ) при наличии рассогласований её параметров. Полагается, что все возможные рассогласования двух видеокамер (ВК) в БСТЗ [1–3] можно привести к случаю рассогласования параметров 2-й ВК относительно 1-й. В результате калибровки БСТЗ получены оценки рассогласований БСТЗ (несоосность – отклонения оптических осей ВК по углу места  $\alpha$ , крена  $\beta$ , тангажа  $\gamma$ ; расфокусирование – разность фокусных расстояний объективов ВК  $\delta f = f_{\text{ВК}2} - f_{\text{ВК}1}$ ; и смещение оптических центров ВК вдоль осей  $X - \delta x$ ,  $Y - \delta y$ ,  $Z - \delta z$  декартовой системы координат БСТЗ), устранение которых не представляется возможным. Ставится задача анализа методов учета рассогласований при измерениях БСТЗ и оценки качества измерений при применении методов учета оцененных рассогласований.

Влияние на изображения стереопары рассогласований параметров цифровой БСТЗ можно разделить на две группы: 1) приводящие к линейным, а, следовательно, легко компенсируемым изменениям; 2) приводящие к изменениям в изображениях, величина которых зависит от априорно неизвестного удаления проецируемых объектов сцены. В зависимости от группы меры компенсационного характера применяются либо ко всему изображению фотоматрицы ВК, либо индивидуально к проекции точки трехмерной сцены на фотоматрице ВК.

Ко второй группе относятся рассогласования, связанные со смещением оптического центра ВК2 по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . При априорно неизвестном удалении проецируемых в изображение ВК объектов сцены величину поправочных коэффициентов для данных рассогласований рассчитать не представляется возможным. Поэтому компенсационные меры применяются индивидуально к интересующей проекции точки трехмерной сцены на матрицу ВК2. Рассмотрим, как можно использовать полученные оценки рассогласований, связанные со смещением оптического центра ВК2 по координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , при производстве измерений БСТЗ.

При наличии смещения оптического центра ВК2 по координате  $X$  разумным решением представляется корректировка величины стереобазы БСТЗ на  $\hat{\delta}x$  при нахождении координат точек наблюдаемой трехмерной сцены.

Статистические исследования [2, 3] влияния рассогласований показали независимость точечных оценок по координатам  $X, Z$  от смещения оптического центра ВК2 по координате  $Y$  при малых значениях  $\delta y$ . Среднее величины ошибок измерений по координате  $Y$  при наличии  $\delta y$  составляет  $\bar{\varepsilon}_y \approx -\delta y / 2$ . Отношения среднеквадратических отклонений (СКО) ошибок измерений при малых значениях от-

клонений  $\delta y$   $\frac{\hat{\sigma}[\varepsilon_y]_{(\delta y \neq 0\text{м})}}{\hat{\sigma}[\varepsilon_y]_{(\delta y = 0\text{м})}} \approx 1$ . Следовательно, располагая оценкой  $\hat{\delta}y$  смещения по координате  $Y$  оптического центра ВК2, ее можно учесть при определении координат точек наблюдаемой трехмерной сцены.

Выражение для точечных оценок координат точек трехмерной сцены [1] с учетом оценок  $\hat{\delta}x$ ,  $\hat{\delta}y$  примет вид

$$\begin{cases} \hat{z} = (b + \hat{\delta}x) \frac{f_{\text{ВК}}}{(i_{\text{ВК}2} - i_{\text{ВК}1}) \Delta_x}; \\ \hat{x} = (b + \hat{\delta}x) \frac{(N + 1) - i_{\text{ВК}2} - i_{\text{ВК}1}}{2(i_{\text{ВК}2} - i_{\text{ВК}1})}; \\ \hat{y} = (b + \hat{\delta}x) \frac{(M + 1) - 2j_{\text{ВК}1}}{2(i_{\text{ВК}2} - i_{\text{ВК}1})} - \frac{\hat{\delta}y}{2}. \end{cases}$$

Разработка простого механизма компенсации смещения оптического центра ВК2 по координате  $Z$  при измерениях весьма затруднительна в силу того, что априорно неизвестно удаление проецируемых в изображение ВК2 объектов сцены. В этих условиях возможно применение метода последовательного приближения. Полагается, что нам известна после проведения процедур калибровки стереосистемы  $\delta z$  оценка смещения оптического центра ВК2 по координате  $Z$ . Обратимся к рис. 1.

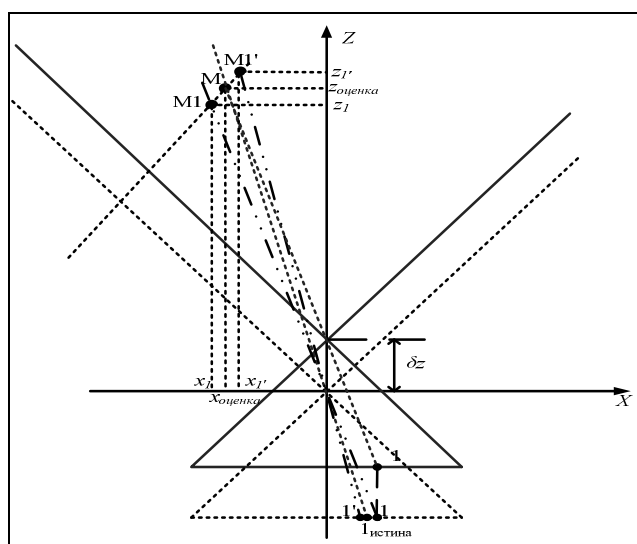


Рис. 1. Метод последовательного приближения

Точка трехмерной сцены  $M$  проецируется при наличии смещения оптического центра ВК2 по координате  $Z$  в точку матрицы ВК2, обозначенную как 1. Если полагать, что рассогласование отсутствует (такое положение ВК2 обозначено пунктиром), то тогда бы мы получили оценку положения точки  $M$ , обозначенную на рис.1 как  $M1$  с координатами  $(x_1, y_1, z_1)$ . Однако зная, что в системе имеются рассогласования, следует применить поправочный (масштабный) коэффициент, значение которого будет переоценено (недооценено) в связи с неправильностью определения глубины точки сцены. Такая переоценка (недооценка) масштабного коэффициента при его применении приведет к смещению проекционной точки 1 на матрице ВК2 в точку 1'. Вычислив новую оценку положения точки  $M$  при использовании проекции 1' на ВК2, получим точку  $M1'$  с координатами  $(x_{1'}, y_{1'}, z_{1'})$ . Очевидно, что итоговая оценка положения точки  $M$  будет определяться координатами, вычисляемыми как

$$\hat{x} = \frac{x_1 + x_{1'}}{2}, \quad \hat{y} = \frac{y_1 + y_{1'}}{2}, \quad \hat{z} = \frac{z_1 + z_{1'}}{2}.$$

Масштабный коэффициент  $k_z$  для приведения проекции 1 в проекцию 1' на матрице ВК2 вычисляется из соотношения  $\delta z = (1 - k_z) * z_1$ .

Идея второго способа вычисления масштабного коэффициента  $k_z$ , применимого к проекции точки трехмерной сцены  $M$  на матрицу ВК2, заключается в том, что при идеальной согласованности БСТЗ сопряженные пиксели на изображениях стереопары должны иметь совпадение в номерах строк, т.е.  $j_{BK1} = j_{BK2}$ . При смещении оптического центра ВК2 по координате  $Z$  равенство  $j_{BK1} = j_{BK2}$  будет нарушено. Тогда масштабный коэффициент будет получен через соотношение  $k_z = \frac{|M + 1 - 2j_{BK1}|}{|M + 1 - 2j_{BK2}|}$ .

При наличии смещения оптического центра ВК2 по координате  $Z$  масштабные коэффициенты вычисляются и применяются индивидуально для конкретной проекции на матрицу ВК2 измеряемой точки.

При наличии расфокусирования БСТЗ масштабный коэффициент, наоборот, должен быть применен сразу ко всему изображению матрицы ВК2. При наличии оценки расфокусирования  $\delta f = f_{\text{ВК2}} - f_{\text{ВК1}} = (k_f - 1) f_{\text{ВК1}}$  масштабный коэффициент

$$k_f \text{ вычисляется } k_f = 1 - \frac{\delta f}{f_{\text{ВК1}}}.$$

Также можно применить и методику расчета масштабного коэффициента  $k_f$ , описанную для компенсации влияния смещения оптического центра ВК2 по координате  $Z$   $k_f = \frac{|M + 1 - 2j_{\text{ВК1}}|}{|M + 1 - 2j_{\text{ВК2}}|}$ .

Механизм компенсации изменений, вносимых в изображение ВК2 отклонением оси по углам места и тангажа, схож. Вначале следует устранить величину смещения по горизонтали (вертикали) геометрического центра изображения ВК2 от главной точки фотоматрицы. Для устранения линейных искажений изображения ВК2, применить масштабирующий коэффициент  $k_\alpha$  ( $k_\gamma$ ), величина которого опять же определяется оценкой рассогласованности осей ВК по углу места (тангажа)

$$k_\alpha = 1 - \text{tg}(\hat{\alpha}), \quad k_\gamma = 1 - \text{tg}(\hat{\gamma}).$$

Для устранения влияния рассогласованности осей ВК по углу крена следует произвести обратный поворот относительно главной точки матрицы изображения ВК2 на оцененный угол крена.

Для проверки эффективности методов учета оценок неустраненных рассогласований при измерениях рассогласованной БСТЗ, проведены модельные эксперименты, схема которых заключается в следующем.

Имеется БСТЗ с известными параметрами. Задан набор случайных, равномерно распределенных в измерительном пространстве точек сцены. Измерительное пространство ограничено по глубине сцены заданной диспаратностью.

1. Производится измерение координат точек сцены идеально согласованной системой. Определяются параметры качества измерений (СКО и среднее ошибок измерений) по всем координатам.

2. В БСТЗ вводятся рассогласования параметров  $\Delta$ . На том же наборе случайных точек сцены производится измерение их координат рассогласованной системой. Определяются параметры качества измерений по всем координатам при наличии рассогласований.

3. Производится оценка  $\hat{\Delta}$  величин рассогласований параметров БСТЗ проведением калибровки. Оцененные величины рассогласований  $\hat{\Delta}$  учитываются при производстве измерений рассогласованной БСТЗ на исходном наборе случайных точек сцены. Определяются параметры качества измерений БСТЗ по всем координатам при учете рассогласований.

4. Производится сравнение показателей качества измерений, полученных при реализации п. 1,2,3 схемы модельного эксперимента.

Для модельного эксперимента выбрана БСТЗ с параметрами: расстояние между ВК (стереобаза) – 0,5 м; фокусное расстояние ВК – 8 мм; размер пикселя  $\Delta_x = \Delta_y = 3$  мкм; размер матрицы  $N \times M = 1600 \times 1200$ . Зона измерений ограничена диспаратностью  $d_\Delta \geq 25$ , или максимальная глубина измерения точек сцены составляет

$$Z_{\text{max}}(d_\Delta = 25) = \frac{f}{\Delta_x} * \frac{b}{d_\Delta - 1} = \frac{8 * 10^{-3} * 0,5}{3 * 10^{-6} * (25 - 1)} \approx 55,56 \text{ (м)}.$$

Объем набора случайных, равномерно распределенных точек сцены  $Q = 32000$ . Результаты расчета параметров качества измерений идеально согласованной БСТЗ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры качества измерений согласованной БСТЗ**

Статистические распределения ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
Центральные моменты распределений ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
$\bar{\varepsilon}_x _{\Delta=0} \approx 0 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_x] _{\Delta=0} \approx 0,103 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_y _{\Delta=0} \approx 0 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_y] _{\Delta=0} \approx 0,078 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_z _{\Delta=0} \approx 0,04 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_z] _{\Delta=0} \approx 0,595 \text{ м}.$

При значениях рассогласований  $\Delta$  БСТЗ  $\delta f = 0,03 \text{ мм}; \alpha = 0,4 \text{ град}; \beta = 0 \text{ град}; \gamma = 0 \text{ град}; \delta x = 6 \text{ мм}; \delta y = 0 \text{ мм}; \delta z = 0 \text{ мм}$  получены параметры качества измерений на исходном наборе точек сцены рассогласованной БСТЗ, представленные в табл. 2. Выбор значимых рассогласований  $\Delta$  БСТЗ в эксперименте не случаен. Такой набор имитирует один из наихудших вариантов рассогласований [3].

Таблица 2

**Параметры качества измерений рассогласованной БСТЗ**

Статистические распределения ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
Центральные моменты распределений ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
$\bar{\varepsilon}_x _{\Delta \neq 0} \approx 0,08 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_x] _{\Delta \neq 0} \approx 2,41 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_y _{\Delta \neq 0} \approx -0,03 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_y] _{\Delta \neq 0} \approx 1,82 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_z _{\Delta \neq 0} \approx -12,34 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_z] _{\Delta \neq 0} \approx 6,44 \text{ м}.$

Представленные в табл. 2 параметры качества измерений рассогласованной БСТЗ свидетельствуют о многократном увеличении СКО ошибок измерений координат точек сцены по сравнению с измерениями согласованной БСТЗ. Так,

$$\frac{\hat{\sigma}[\varepsilon_x]|_{\Delta \neq 0}}{\hat{\sigma}[\varepsilon_x]|_{\Delta = 0}} \approx \frac{2,41}{0,103} = 23,4; \quad \frac{\hat{\sigma}[\varepsilon_y]|_{\Delta \neq 0}}{\hat{\sigma}[\varepsilon_y]|_{\Delta = 0}} \approx \frac{1,82}{0,078} = 23,3; \quad \frac{\hat{\sigma}[\varepsilon_z]|_{\Delta \neq 0}}{\hat{\sigma}[\varepsilon_z]|_{\Delta = 0}} \approx \frac{6,44}{0,595} = 10,8.$$

Кроме того, наблюдается значительный рост (в абсолютных величинах  $\approx$  в 310 раз) средних ошибок измерений по координате  $Z$ . Отличными от нуля стали и значения средних ошибок измерений по координатам  $X$  и  $Y$ .

Проведением калибровки [4] БСТЗ определена (рис. 2) оценка  $\hat{\Delta}$  вектора рассогласований:  $\hat{\delta}f = 0,03$  мм;  $\hat{\alpha} = 0,4$  град;  $\hat{\beta} = 0$  град;  $\hat{\gamma} = 0$  град;  $\hat{\delta}x = 6$  мм;  $\hat{\delta}y = 0$  мм;  $\hat{\delta}z = 0$  мм.

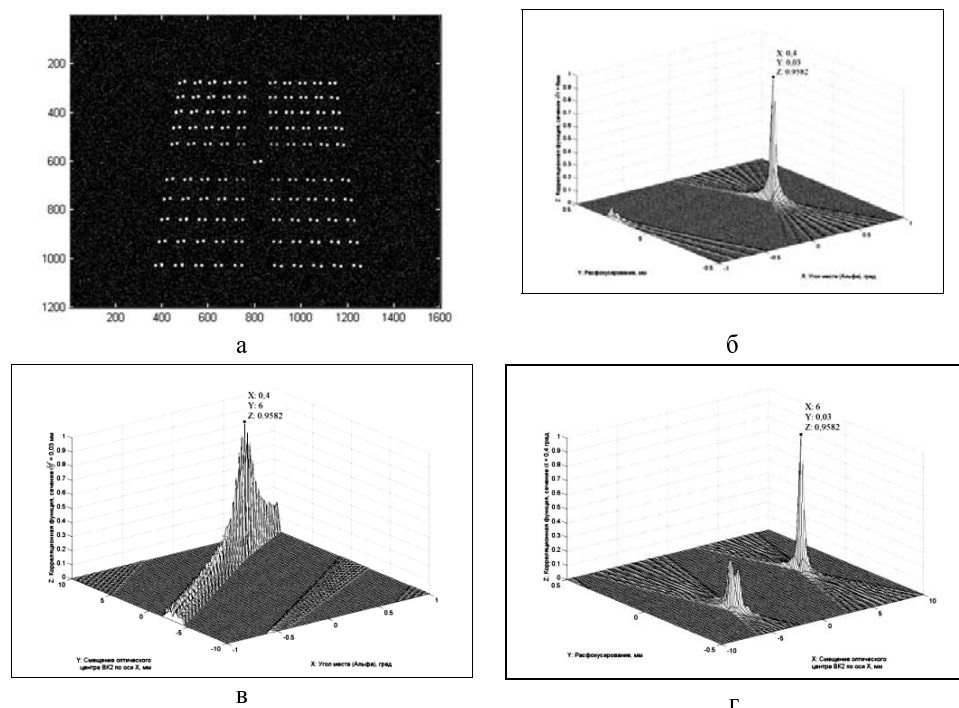


Рис. 2. Результаты калибровки БСТЗ: а – наложенные изображения калибровочных объектов стереопары; сечения нормированной взаимокорреляционной функции изображений ВК1 и ВК2 в плоскостях рассогласований: б –  $\alpha$ - $\delta f$  при  $\hat{\delta}x = 6$  мм; в –  $\alpha$ - $\delta x$  при  $\hat{\delta}f = 0,03$  мм; г –  $\delta x$ - $\delta f$  при  $\hat{\alpha} = 0,4$  град.

При учете выявленных рассогласований в измерениях координат точек трехмерной сцены получены показатели качества измерений, представленные в табл. 3. Полученные данные свидетельствуют о значительном уменьшении СКО ошибок измерений по всем координатам и приближении их к значениям для согласованной БСТЗ.

Значение 3-х СКО ошибок измерений по координате  $Z$ , приведенное к максимальной глубине измерений  $Z_{\max}$  точек сцены, увеличилось по сравнению с согласованной системой не более чем

$$\frac{3\hat{\sigma}[\varepsilon_z]_{\Delta=\hat{\Delta}} - 3\hat{\sigma}[\varepsilon_z]_{\Delta=0}}{Z_{\max}} < 1,8 (\%).$$

Таблица 3

**Параметры качества измерений рассогласованной БСТЗ при учете выявленных рассогласований**

Статистические распределения ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
Центральные моменты распределений ошибок измерений координат точек трехмерной сцены		
$\bar{\varepsilon}_x _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx 0,004 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_x] _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx 0,167 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_y _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx -0,001 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_y] _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx 0,118 \text{ м}.$	$\bar{\varepsilon}_z _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx 0,048 \text{ м},$ $\hat{\sigma}[\varepsilon_z] _{\Delta-\hat{\Delta}} \approx 0,899 \text{ м}.$

Значения средних ошибок измерений по всем координатам после учета в измерениях полученных оценок рассогласований не существенно отличаются от значений для согласованной системы.

Очевидно, что предварительным этапом перед использованием БСТЗ как измерителя должен быть этап калибровки, позволяющий получить максимально правдоподобные оценки рассогласований, устранение которых не представляется возможным. Знание значений рассогласований позволяет их учитывать в измерениях БСТЗ представленными методами для получения результатов с приемлемым качеством.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трехмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2011. – Т. 7. № 3. – С. 38-48.
2. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ ошибок измерений глубины точек трехмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 83-93.
3. Кравцов С.В. Влияние рассогласований параметров стереоскопического измерителя на точность измерений // Информационное противодействие угрозам терроризма. – 2011. – № 17. – С. 46-56.
4. Кравцов С.В. Определение рассогласований параметров цифровой системы стереозрения посредством информационного и корреляционного анализа изображений стереопары // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 4 (129). – С. 108-113.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Зори.

**Кравцов Сергей Валентинович** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: krsvtg@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634312018; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; заведующий лабораториями; ассистент.

**Kravtsov Sergey Valentinovich** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: krsvtg@rambler.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634312018; the department of information security telecommunication systems; head of laboratories; assistant.