

## ОБНАРУЖЕНИЕ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### Введение

При разработке радиотехнических систем передачи и извлечения информации возникает задача обнаружения сигнала на фоне шумов и помех [1]. Обозначим полезный сигнал через  $x(t)$ , аддитивный шум через  $n(t)$ , тогда можно записать выражение для входного сигнала приёмника обнаружения:

$$s(t) = d \cdot x(t) + n(t). \quad (1)$$

Переменная  $d$  в выражении (1) принимает одно из двух значений – 1 (сигнал есть), либо 0 (сигнала нет).

Процедура обнаружения заключается в сравнении энергии сигнала с пороговым значением. В зависимости от принятого критерия оптимальности обнаружения порог определяется требуемыми вероятностями ошибок первого и второго рода [1 – 4]. В случае если принят критерий Неймана – Пирсона, порог определяется исходя из требуемой вероятности ложной тревоги:

$$P_{\text{ЛТ}} = \int_{Z_0}^{\infty} S_N(u) du, \quad (2)$$

где  $S_N(u)$  – закон распределения напряжения шума на входе порогового устройства, а  $Z_0$  – искомое значение порога [2]. Для оценивания энергии сигнала производится расчет его автокорреляционной функции:

$$E = \int_0^T x^2(t) dt = R(0), \text{ где } R(\tau) = \int_0^T x(t) \cdot x_0(\tau - t) dt.$$

Расчет автокорреляционной функции может производиться с помощью коррелятора или согласованного фильтра. В обоих случаях предполагается наличие полной априорной информации о параметрах сигнала. Схема одноканального корреляционного приемника полностью известного сигнала приведена на рис. 1.

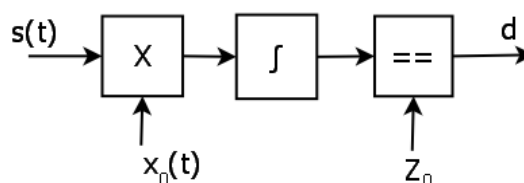


Рис. 1. Схема одноканального корреляционного приемника

Рассмотрим задачу обнаружения сигнала с априорно неизвестным параметром. Обозначим реализацию случайного процесса на входе системы через

$$s(t) = d \cdot x(t, \alpha) + n(t),$$

где  $x(t, \alpha)$  – сигнал с неизвестным параметром  $\alpha$ . Пусть параметр  $\alpha$  может принимать любое произвольное значение из интервала  $\alpha_1 \dots \alpha_2$ . Тогда распространенным методом решения подобной задачи является использование многоканального фильтрового или корреляционного приемника (рис. 2). Каждый из каналов рассчитан на обнаружение сигнала с некоторым значением неизвестного параметра  $\alpha_i$ . В случае, если значение параметра  $\alpha$  для сигнала  $x(t)$  в точности равно  $\alpha_i$ , на выходе  $i$ -го канала получаем оценку энергии сигнала:

$$\tilde{E}_i = \int_0^T s(t, \alpha_i) \cdot x_0(t, \alpha_i) dt.$$

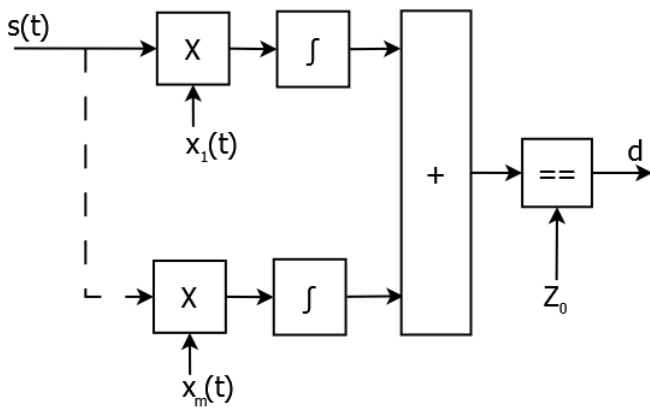


Рис. 2. Схема многоканального корреляционного приемника

При условии, что истинное значение параметра  $\alpha'$  не равно какому-то из значений  $\alpha_i$  в каналах приемника, оценка энергии сигнала будет заниженной на некоторую величину  $\Delta E$ , что приведет к снижению вероятности правильного обнаружения на величину  $\Delta P$ .

В качестве примера, на рис. 3 – 4 приведена зависимость  $E = f(\Delta\alpha)$  и  $P = f(q)$  для случая обнаружения прямоугольного радиоимпульса при вероятности ложной тревоги  $P_{\text{лж}} = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$  (кривые 1 – 4 на рис. 4). При этом параметр  $\alpha$  имеет смысл частоты заполнения:  $\Delta\alpha = (f' - f) / \Delta f$ .

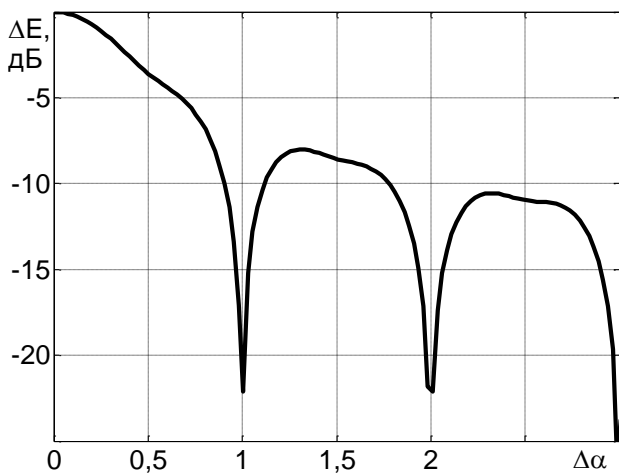


Рис. 3. Зависимость оценки энергии от относительной расстройки по частоте

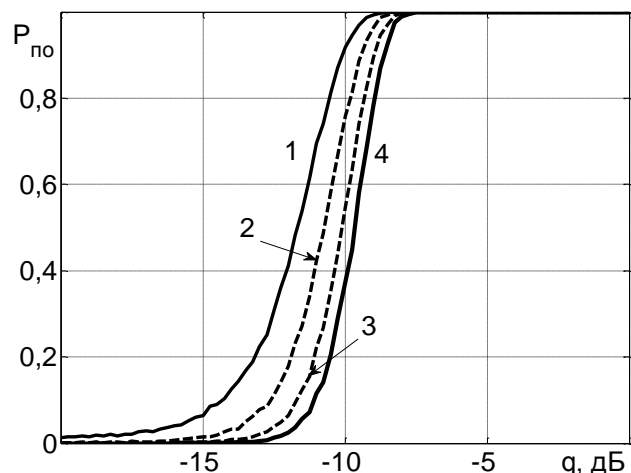


Рис. 4. Характеристики обнаружения полностью известного сигнала

### Постановка задачи

При разработке подобной системы задаются допустимым снижением вероятности правильного обнаружения  $\Delta P_{\text{доп}}$ . Это позволяет оценить допустимое  $\Delta q = \sqrt{2 \cdot \Delta E_{\text{доп}} / N_0}$ , откуда найти  $\Delta E_{\text{доп}}$ , в итоге получив допустимое значение  $\Delta\alpha$ . Число каналов может быть оценено как

$$N_K = \left\lceil \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\Delta\alpha} \right\rceil. \quad (3)$$

В случае, когда имеется несколько априорно неизвестных параметров сигнала  $A = \{\alpha(1), \alpha(2), \dots, \alpha(m)\}$ , полное число каналов схемы может быть оценено как

$$N_{\text{общ}} = \prod_{j=1}^m N_k(j). \quad (4)$$

С ростом числа каналов вычислительная сложность процедуры обнаружения сигнала быстро возрастает. В вычислительной системе с единственным арифметическим устройством это приводит к замедлению темпа выдачи результатов, что может оказаться неприемлемым. В таком случае необходимо добиваться компромисса между вероятностью правильного

обнаружения и темпом выдачи результатов. В параллельной вычислительной системе, при фиксированном темпе выдачи результатов, можно получить большую вероятность правильного обнаружения за счет увеличения числа каналов.

### Представление результатов

Рассмотрим постановку следующего модельного эксперимента. Имеется задача обнаружения радиоимпульса с частотой заполнения  $f$ . Частота является постоянной в пределах импульса, однако априорно неизвестна, равномерно распределена в интервале от  $f_1$  до  $f_2$ . Допустимый темп выдачи результатов –  $\Delta t$ , допустимые потери вероятности правильного обнаружения –  $\Delta P$ . Рассмотрим варианты программного решения данной задачи на базе современных ПК как в последовательной, так и в параллельной вычислительных системах.

Используем ранее полученные зависимости  $E = f(\alpha - \alpha')$  и  $P = f(q)$  (рис. 3 – 4) и формулу (3) для оценки необходимого числа каналов. Результаты расчетов для случая  $(f_2 - f_1) = 100 \cdot \Delta f$  приведены на рис. 5 – 6.

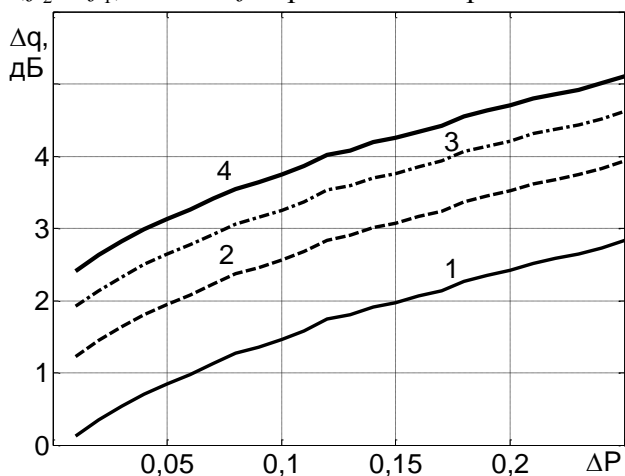


Рис. 5. Зависимость допустимых энергетических потерь от допустимых потерь вероятности правильного обнаружения (1 – вероятность ложной тревоги  $10^{-1}$ , 2 –  $10^{-2}$ , 3 –  $10^{-3}$ , 4 –  $10^{-4}$ )

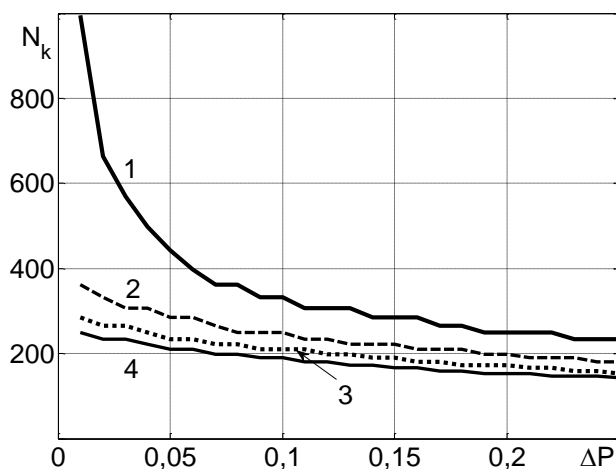


Рис. 6. Зависимость требуемого числа параллельных каналов от допустимых потерь вероятности правильного обнаружения

С увеличением допуска на вероятность правильного обнаружения требования к энергетическим потерям снижаются (рис. 5). Это означает возможность уменьшения количества параллельных каналов в приемнике. Зависимость числа каналов от допустимых потерь вероятности правильного обнаружения приведена на рис. 6. Необходимое число каналов возрастает с ужесточением требований к  $\Delta P$  и с увеличением вероятности ложной тревоги.

Проведем имитационное моделирование работы многоканального корреляционного приемника. При этом рассмотрим ряд конфигураций, отличающихся допуском по  $\Delta P$  в соответствии с полученными оценками числа каналов.

Пороговое значение  $Z_0$  определяется согласно формуле (2). Для этого путем имитационного моделирования строится гистограмма, аппроксимирующая распределение шума на выходе приемника. Зависимость порога от числа параллельных каналов приведена на рис. 7. Порог возрастает линейно с ростом числа каналов, но с различными коэффициентами пропорциональности для разных значений вероятности ложной тревоги. При этом следует отметить, что распределение амплитуд шума на выходе одиночного канала описывается законом Рэлея [1], но по мере роста числа каналов в силу центральной предельной теоремы приближается к нормальному распределению.

Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал/шум показана на рис. 8. Наилучшие характеристики обнаружения обеспечиваются в случае полностью из-

вестного сигнала (кривая 1). С ростом числа каналов (кривые 2 – 6), вероятность правильного обнаружения в многоканальном корреляционном приемнике возрастает.

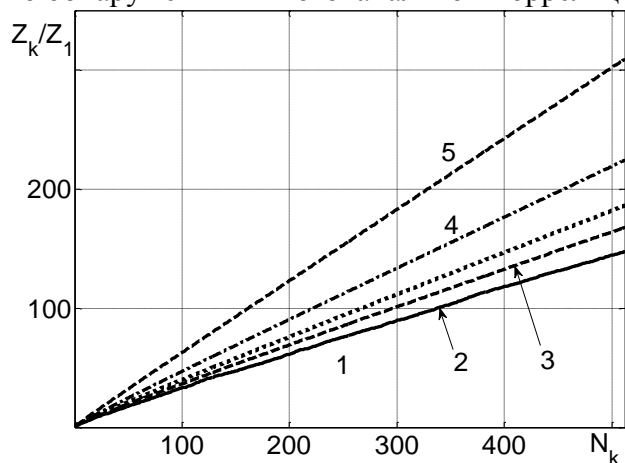


Рис. 7. Зависимость порогового значения от числа параллельных каналов (1 – вероятность ложной тревоги  $10^{-1}$ , 2 –  $10^{-2}$ , 3 –  $10^{-3}$ , 4 –  $10^{-4}$ , 5 –  $10^{-5}$ )

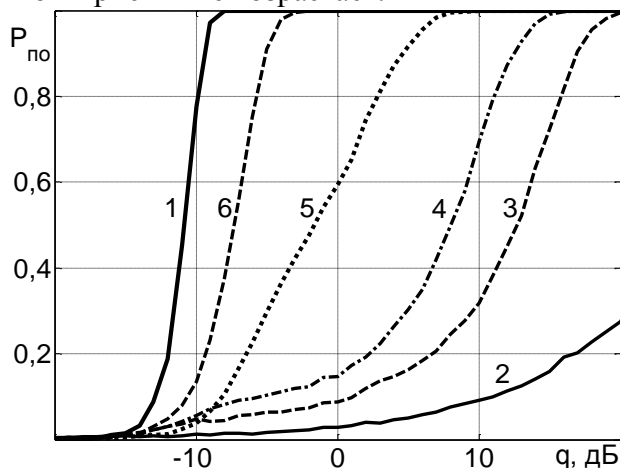


Рис. 8. Характеристики обнаружения.

1 – полностью известный сигнал, 2 – 6 – сигнал со случайной частотой заполнения. (2 – 1 канал, 3 – 8 каналов, 4 – 16 каналов, 5 – 64 канала, 6 – 256 каналов).

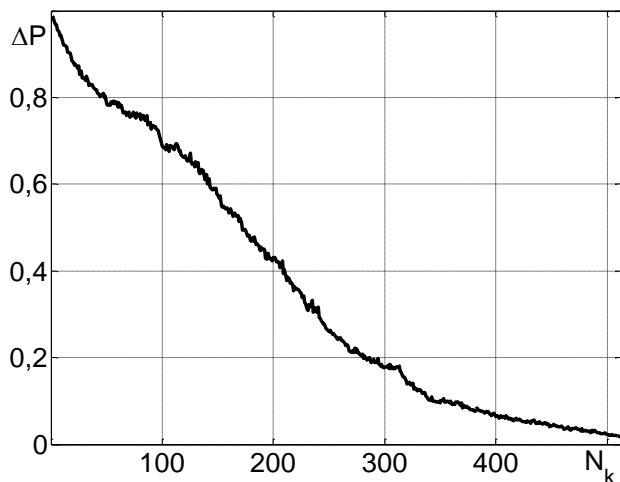


Рис. 9. Зависимость  $\Delta P$  от числа каналов при  $q = -6$  дБ.

На рис. 9 приведена зависимость потерь вероятности правильного обнаружения от числа каналов. Зависимость построена для сигнала со случайной частотой заполнения, опорным значением является вероятность правильного обнаружения для случая полностью известного сигнала. С ростом числа каналов, потери снижаются, асимптотически стремясь к нулю.

Рассмотрим вопросы производительности параллельного корреляционного приемника. Для этого проведем сравнение вычислительной эффективности ряда систем применительно к данной задаче. Технические характеристики использованных вычислительных устройств приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Процессор	Число ядер	Тактовая частота, МГц	Пиковая вычислительная мощность, ГФлоп/с	Относительная вычислительная мощность	Объем ОЗУ, Гб	Пиковая пропускная способность ОЗУ, Гб/с	Тип
Intel Q9400	4	2660	42,56	1	8	12.8	ЦП
GF119	48	1620	155.5	3,65	1	9.6	ГП
G96M	32	1375	132	3,10	1	12.5	ГП
G215	96	1340	386	9,06	0,5	54.4	ГП
GF110	480	1464	1405	33,0	1,25	152	ГП

В списке приведены две разновидности вычислительных устройств – центральные процессоры (ЦП) и графические процессоры (ГП). Динамика развития вычислительных устройств на сегодняшний день такова, что вычислительная мощность ГП возрастает более быстрыми темпами, за счет увеличения числа параллельных вычислительных блоков (арифметико-логических устройств, АЛУ). Кроме того, ГП комплектуются быстродействующими запоминающими устройствами, что также должно способствовать существенному приросту

производительности при решении вычислительных задач, допускающих параллельное исполнение. В последние годы наблюдается значительный интерес к применению ГП в качестве вычислителей в различных отраслях науки, что находит своё отражение в публикациях [6 – 9].

Для сравнительного анализа вычислительной эффективности данных систем в задаче обнаружения сигнала с неизвестными параметрами было разработано программное обеспечение для проведения имитационного моделирования. В функции программного обеспечения входило формирование реализаций сигнала и шума, а также опорных сигналов, и непосредственное проведение процедуры обнаружения. Программное обеспечение разрабатывалось с использованием пакета Microsoft Visual C++ 2008 Express edition. Для разработки программного кода, использующего ГП, применялось ПО Nvidia CUDA Toolkit. Результаты измерения вычислительной эффективности приведены на рис. 10 и в табл. 2.

Таблица 2

Число ядер ЦП	Относительная производительность
1	1
2	1,77
3	2,32
4	2,72

С увеличением числа задействованных ядер ЦП производительность увеличивается. Рост производительности не является линейным, благодаря наличию накладных расходов на доступ к ОЗУ системы.

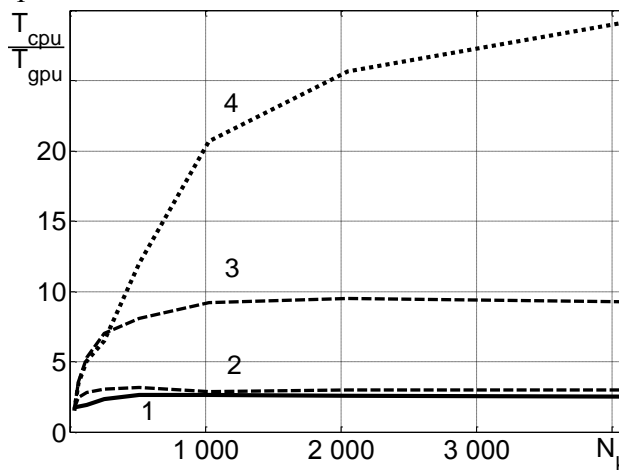


Рис. 10. Зависимость относительного времени обработки от числа параллельных каналов (1 – GF119, 2 – G96M, 3 – G215, 4 – GF110)

С увеличением числа параллельных каналов приемника эффективность использования ГП в качестве вычислительного устройства возрастает (рис. 10). Рост производительности постепенно замедляется с увеличением числа каналов, асимптотически стремясь к максимуму, определяемому относительной вычислительной мощностью ГП. При сравнении конфигураций 1 (графический процессор GF119) и 2 (графический процессор G96M) становится заметно, что первая конфигурация не достигает своей пиковой производительности. Это вызвано наличием медленной видеопамяти у данного ГП, что не даёт возможности реализовать полную загрузку всех вычислительных блоков. ГП в конфигурации 2 имеет меньшую пиковую производительность, однако при этом оснащен более быстрой памятью, что и сказывается на конечном результате. Наиболее производительным из протестированных является графический процессор GF110, обеспечивающий максимальную вычислительную мощность, и при этом оснащенный наиболее быстрой памятью.

Рассмотрим вопрос о числе каналов, которые можно запустить на том или ином исполнительном устройстве при заданных ограничениях на суммарное время обработки  $T_s$ . Для ситуации, когда имеется исполнительное устройство с  $m$  АЛУ, причем каждое из АЛУ способно завершить расчеты по каналу коррелятора за время  $T_1$ , время завершения расчетов по  $N_k$  каналам может быть оценено как  $T_1$  при  $T_0 = N_k \leq m$ , либо  $T_0 = T_1 \cdot N_k / m$  – в противном случае. При этом мы пренебрегаем потерями времени на доступ к памяти и различные системные нужды. Таким образом, число каналов может быть оценено из условия  $T_0 \leq T_s$ :

$$N_k \leq \frac{T_s m}{T_1} \quad (4).$$

Формула (4) справедлива для случаев, когда обеспечивается полная загрузка всех вычислительных блоков используемого процессора (т.е. когда  $N_k \geq m$ ). Если это условие не выполняется, то число каналов можно оценить исходя из следующего соотношения:

$$\begin{cases} N_k = 0, T_1 > T_s \\ N_k = m, T_1 = T_s \end{cases} \quad (5)$$

Оценки числа каналов, реализуемых в рассмотренных конфигурациях вычислительных систем, приведены в табл. 3. Расчет произведен для числа точек в реализации обрабатываемого сигнала, равного 2048.

Таблица 3

Процессор	$T_1, \text{мс}$	m	Число параллельных каналов при $T_s, \text{мс}$		
			1	5	10
Intel Q9400	0,66	4	4	30	60
GF119	3,19	48	-	48	150
G215	1,72	96	-	96	558
GF110	2,73	480	-	480	1758

Графические процессоры обеспечивают реализацию большего числа параллельных каналов по сравнению с универсальным процессором. Время обработки единичного канала линейно зависит от размера реализации обрабатываемого сигнала и составляет порядка единиц миллисекунд. Для центрального процессора это время несколько меньше по сравнению с ГП, однако существенно меньшее число ядер ограничивает его возможности в этой задаче.

При требуемом темпе выдачи результатов 1 миллисекунда, ЦП позволяет реализовать до четырех параллельных каналов (по числу вычислительных ядер). При этом ГП не могут быть использованы ввиду слишком большого времени вычислений по каждому из каналов. В то же время при выполнении условия  $T_s > T_1$  ГП могут использоваться для многоканальной обработки, при этом обеспечивается существенно большее число параллельных каналов по сравнению с ЦП.

## Выводы

Задача обнаружения сигналов с априорно неизвестными параметрами может решаться путем применения многоканального корреляционного или фильтрового приемника. На современном этапе развития вычислительной техники, такая процедура может быть произведена с достаточно высокой производительностью. В данной задаче повышение числа параллельных каналов позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения сигнала.

Автор выражает благодарность коллегам – канд. физ.-мат. наук Петрову В.А. и д-ру техн. наук. проф. Карташову В.М. за конструктивное обсуждение материала, представленного в статье.

**Список литературы:** 1. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника. / В.И. Тихонов – М.:Сов.Радио, 1966. – 678с. 2. Обнаружение радиосигналов / П.С.Акимов и др.; под ред. А.А.Колосова. – М.:Радио и связь, 1989. – 224с. 3. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М. : Сов.радио, 1970. – 560с. 4. Тихонов, В.И., Харисов, В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов. – М. : Радио и связь, 2004. – 608 с. 5. Информационные материалы Nvidia [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nvidia.com/object/personal-supercomputing.html> 6. Xiaoshu Si, Hong Zheng, High Performance Remote Sensing Image Processing Using CUDA // ISECS. – P.121-125, Third International Symposium on Electronic Commerce and Security, 2010. 7. Fung et al. Mediated Reality Using Computer Graphics Hardware for Computer Vision // Proceedings of the International Symposium on Wearable Computing 2002 (ISWC2002). Seattle, Washington, USA, Oct 7-10, 2002, pp. 83 - 89. 8. Alerstam, E., Svensson, T. & Andersson-Engels, S. Parallel computing with graphics processing units for high speed Monte Carlo simulation of photon migration // J. Biomedical Optics 13, 060504 (2008). 9. Литвин-Попович, А.И. Обработка радиолокационных сигналов в параллельных вычислительных системах / Литвин-Попович А.И. // Радиотехника : Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2011. – Вып. 166. – С. 165-172.

