

Многокритериальная оптимизация контролепригодности сложных систем

М.Е.Бушуева, В.В.Беляков¹

*Нижегородский государственный технический университет
ул. Минина 24, Нижний Новгород, 603600, Россия*

В работе рассматриваются концептуальные теоретические аспекты многокритериального проектирования диагностических систем технических объектов и их структурных взаимосвязей. Совокупность технических объектов и их структурных внутренних взаимосвязей определяется как сложная система. К внутренним взаимосвязям относится программно-алгоритмическое обеспечение диагностических программ и линии коммутации. Разработана обобщенная концепция многокритериального проектирования технической диагностики неисправностей.

Приведенный в работе метод многокритериального проектирования диагностических систем и их программно-алгоритмического обеспечения обладает высокой степенью универсальности и может быть использован в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий.

1. Введение

Сложные системы, в том числе и технические, требуют обеспечения высокого уровня качества функционирования и надежности. Это требование становится особенно актуальным в случае, когда от работы системы зависит выполнение поставленной оперативно-функциональной задачи, сопряженной с опасностью потери человеческих жизней или значительных капитальных финансовых вложений. Резервом повышения надежности является переход от планово-предупредительного обслуживания и ремонта к обслуживанию и ремонту по действительному техническому состоянию. Использование этой стратегии обслуживания требует широкого применения средств и методов автоматизированного контроля и диагностирования. В связи с этим возникает необходимость обеспечения такого свойства изделия (объекта технического диагностирования), которое позволило бы с минимальными затратами достоверно определить его техническое состояние.

Проект НАТО Наука для Мира “Разработка радиационно-стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа” напрямую направлен на повышение надежности сложных технических полупроводников объектов, работающих в тяжелых условиях эксплуатации. Проблема обеспечения контролепригодности этих технических объектов является весьма актуальной. Рассматриваемые в работе методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности, особенно при кратных дефектах в объекте, являются частью общей проблемы обеспечения контролепригодности технических систем в условиях нечеткой информативности: количество необходимых точек контроля и измеряемых параметров, достоверность внешних воздействий на объект, прогнози-

¹ Тел./Fax: +7-8312-366364; E-mail: amf@adm.nntu.sci-nnov.ru

рование финансовых затрат на его разработку, производство и эксплуатацию. Данная работа является логическим продолжением развитием и завершением материалов, изложенных в работе [3].

2. Обобщенная концепция многокритериального проектирования технической диагностики неисправностей в условиях нечеткой информативности

Функционирование сложных технических систем, в особенности электронных, в структурах управления оперативно-функциональными объектами, весьма чувствительных к внешним влияниям (излучение, температура, влажность, механические воздействия, биологическая агрессивность, и т.д.), с течением времени может не только изменять свои параметры в допустимых пределах, но катастрофически приводить их к таким значениям, которые не только не совместимы с их нормальной работой, но опасны для окружающей среды и могут явиться причиной самоликвидации (разрушения). Распознавание и прогнозирование таких ситуаций выходит за пределы простой диагностики.

Во-первых, это сопряжено с неточностью получаемой информации и ограниченностью числа параметров диагностирования по мере старения системы или несанкционированного доступа к ней. Во-вторых, с недостаточностью точек контроля системы, в особенности в условиях кратных дефектов [1–2]. В-третьих, отсутствием своевременного мониторинга и прогнозирования поведения окружающей среды, влияющей на процесс работы системы в режиме реального времени. В-четвертых, для систем технической диагностики, встроенных в комплексы управления, важной составляющей является временной фактор, то есть скорость принятия решения. В-пятых, любое усложнение системы диагностирования приводит к “нежелательным”, со стороны заказчика, финансовым вложениям в их разработки и производство.

В предыдущей работе [3] был опущен вопрос об оптимальности числа измеряемых в каждой точке контроля диагностических параметров $r_j \in R$ ($j = \overline{1, J}$). Следует заметить, что минимизация числа измеряемых параметров в точке контроля ($r \rightarrow \min$) напрямую связана с надежностью программно-алгоритмического обеспечения как систем управления, так и систем, выполняющих диагностику изделия. В данной ситуации задача создания оптимальной диагностической системы может быть реализована в виде двух случаев ее постановки.

- *Первый случай:* $r(p_i) = \text{const}, \forall p_i \in P$ – в каждой точке контроля число измеряемых параметров заранее заданно и не может изменяться при оптимизации системы диагностирования, то есть R минимально по определению.

- *Второй случай:* $r(p_i) = \text{var}, \forall p_i \in P$ в каждой точке контроля число измеряемых параметров заранее заданно, но при реализации системы диагностирования требуется отобрать такое их число, чтобы выполнялось условие максимальной глубины диагностирования и минимальной стоимости реализации дополнительной точки контроля [1–3]. Для оценки этого условия вводится функция *ценности* использования точки контроля по числу измеряемых параметров, обеспечению глубины

поиска дефекта и стоимости реализации $S_{[r]} = \Phi(r(p_i), K_{г.п.}/c(p_i))$, где $K_{г.п.}$ – коэффициент глубины поиска дефектов [1–3], $c(p_i)$ – стоимость измеряемой информации в точке контроля. В этом случае предполагается, что $S_{[r]} \rightarrow \max$.

Техническая система обязательно взаимодействует с внешней средой. Поэтому происходит изменение величин диагностируемых параметров под влиянием внешних условий. Прогнозирование этого влияния является составной частью встроенных систем диагностирования.

Внешняя среда может воздействовать на техническую систему через определенный набор физических, химических или биологических возмущающих факторов. Таким образом, на систему воздействует некоторое количество внешних возмущений h_j ($j = \overline{1, H}$). Эти факторы воздействуют как на объекты, так и на структурные связи. При этом информация о внешнем воздействии и ее следствиях является *нечеткой*, а принятое решение по результатам диагностирования должно носить четкий (правильный) характер. Более того, входная информация о внешнем воздействии должна быть минимизирована ($H \rightarrow \min$) для повышения ее четкости.

Измерение параметров состояния внешней среды рассматривается как организация точки контроля основания технической системы, в которой измеряется h_j – параметров и характеристик, образующих множество H . Для определения минимального количества параметров внешнего воздействия целесообразно воспользоваться понятием *ценности*. Функция ценности измеряемого параметра внешнего воздействия на обеспечение глубины поиска дефекта и стоимость реализации данного измерения функционально будет иметь вид $S_{[h]} = \Phi(h_j, K_{г.п.}/c_j)$, ($j = \overline{1, H}$), где c_j – стоимость реализации каждого измерения внешнего параметра. Таким образом, как и в случае внутренних параметров, $S_{[h]} \rightarrow \max$. Работоспособность и качество системы диагностирования оцениваются незамедлительностью выдачи информации о местонахождении, типе и причине неисправности при проведении мониторинга технической системы и окружающей среды. Таким образом, во-первых, система диагностирования должна обладать высоким *быстродействием*. Во-вторых, отысканию местонахождения дефекта способствует правильно организованная поисковая функция, которая связана с *коэффициентом глубины поиска*. В-третьих, система отыскания неисправности (дефекта) должна располагать методологией правильного распознавания и классификацией *признаков дефектов* любой кратности. Распознавание и классификация неисправностей определяет их тип и причину возникновения.

Решению второй проблемы посвящены исследования [1–3], первой проблеме из приводимого библиографического списка – работы [6–8], а третьей – лишь [6]. В целом, проблема быстродействия диагностических систем может быть успешно решена распараллеливанием потоков обработки диагностической информации путем применения *вычислительных систем с массовым параллелизмом – нейронных сетей* [6–8].

Наиболее дешевым и простым способом повышения быстродействия диагностических систем является введение в их контрольно-измерительный комплекс вычислительных систем с архитектурой SISD по классификатору Б.М.Когана [7], но

с использованием в них программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего эмулировать *виртуальную нейронную сеть*. Другим подходом является *аппаратная реализация* в контрольно-измерительном комплексе *реального нейронного компьютера* на основе вычислительной системы с архитектурой MIMD [7].

Быстродействие нейронной сети по обработке диагностической информации зависит от числа нейронов в слоях нейронной сети. Согласно [8], для оценки числа нейронов в скрытых слоях однородных нейронных сетей можно воспользоваться формулой для определения необходимого числа *синаптических весов* $L_{[w]}$ в многослойной нейронной сети с сигмовидными передаточными функциями: $mN(1 + \log_2 n)^{-1} \leq L_{[w]} \leq m(1 + Nm^{-1})(n + m + 1) + m$, где n – размерность входного сигнала X ; m – размерность выходного сигнала Y ; N – число элементов обучающей выборки. Оценив необходимое число синаптических весов, можно рассчитать число нейронов в скрытых слоях. Например, для двухслойной сети [8]: $L = L_{[w]}(n + m)^{-1}$. Число нейронов во внутренних слоях зависит от размерностей входных и выходных сигналов, то есть $L = L(X_k, Y_k)$, $k = \overline{1, N}$ и может быть подвергнуто минимизации ($L \rightarrow \min$), что приведет к повышению быстродействия обработки диагностической информации.

Как было показано, в точках контроля система диагностики измеряет некоторое число параметров r_j ($j = \overline{1, R}$). При этом имеется система измерения внешних параметров h_j ($j = \overline{1, H}$) воздействия на техническую систему. Таким образом, обе группы параметров R и H объединяются в множество выходных параметров системы диагностики, определяющих *рабочее диагностическое пространство* [3], то есть $R \cup H \subset B$. Так как считается, что вычислительная система, которая обрабатывает диагностическую информацию, входит в состав системы контроля, то на вход нейронной сети подается множество диагностических параметров и, как следствие, $R \cup H \subset X$.

Для определения минимального количества входных параметров, как ранее, целесообразно воспользоваться понятием *ценность*. Функция ценности, характеризующая обеспечение глубины поиска дефекта и стоимость получения входных параметров в нейронную сеть, которые выбраны из рабочего диагностического пространства, имеет вид $S_{[X]} = \Phi(S_{[r]}, S_{[h]}) = \Phi(X_k, K_{r.n.}/c_k)$, ($k = \overline{1, N}$), где c_k – стоимость получения каждого входного параметра.

Нейронные сети являются универсальными структурами, позволяющими реализовать любой вычислительный алгоритм, в том числе, и в задачах диагностики технических систем с оптимальным быстродействием. Как видно из функции $V_{[X \rightarrow Y]} = V_{[X \rightarrow Y]}(L(X, Y); S_{[X]})$ скорость обработки диагностической информации зависит от числа выходных параметров Y_k ($k = \overline{1, m}$). Выходная информация представляет собой определение типа дефекта в технической системе, его причин и последствий.

В результате обработки вектора входных сигналов X_k ($k = \overline{1, n}$), определялся вектор выходных характеристик состояния технической системы Y_k ($k = \overline{1, m}$), по которому принимается одно из решений о функционировании системы: исправна;

частично исправна и может функционировать с ограничениями; неисправна и требуется техническое обслуживание или ремонт; пришла в нерабочее невосстанавливаемое состояние и требуется утилизация.

В диагностике технических систем нередко проявляются дефекты, при которых связь между признаками и причинами неисправностей носит неоднозначный характер. Простые двузначные утверждения типа “исправный – 1” / “неисправный – 0” недостаточны, поскольку четкие правила поиска неисправностей в системе основываются на взаимоднозначном соответствии между причиной и признаками неисправностей, то есть они жестко детерминированы в правилах. Современные диагностические системы должны распознавать опасные условия функционирования, причины и тип возникшей неисправности. Помимо этого ожидается также информация об оценке оставшегося срока службы всей технической системы или ее составной части.

Таким образом, выходные параметры диагностической системы должны определять с одной стороны причину и тип дефекта (неисправности), с другой стороны - состояние объекта диагностирования, его соответствие оперативно-функциональному назначению.

Д.Баршдорф в работе [6] пишет, что важным шагом в любом методе диагностики отказов является построение математической модели, дающей адекватную информацию о функционировании системы. Диагностирование неисправностей системы при помощи *детерминистических методов* распознавания дефектов эффективно при наличии *математической модели* ее функционирования. Эти модели в большинстве случаев можно анализировать лишь численными методами, что накладывает ограничение на их использование в реальном времени при поиске неисправностей и управлении технической системой. Почти все реальные процессы функционирования технических систем имеют нелинейное поведение, для них характерно возникновение нештатных ситуаций. В этих случаях обычно используют экспертов, то есть происходит вмешательство человека в процесс диагностирования и управления технической системой. Если детерминистические знания недоступны или математическое моделирование требует больших затрат расчетного времени, либо не обеспечивает требуемой точности, то могут быть использованы другие методы. Такими методами являются моделирование знаний оператора при помощи эвристических познаний и стратегий логического вывода, как например, это делается в экспертных системах на основе нечетких логик с реализацией их на базе *аппаратных* или программно-алгоритмических *эмуляционных* нейронных сетей [6].

Нейронные сети оказались полезными как средство контроля механизмов. Нейронная сеть может быть обучена так, чтобы отличить звук, который издает машина при нормальной работе (“ложная тревога”) от того, который является предвестником неполадок.

Обученная нейронная сеть, на основе мониторинга окружающих условий по радиационному фону, может с высокой степенью точности предсказать появление дефектов в полупроводниковых приборах и оценить степень их живучести, то есть

своевременно вывести технический объект (робота) из зоны опасного воздействия радиации для его ремонта.

Обе задачи связаны с классификацией дефектов по вектору признаков, в первом случае – внешние механические воздействия и акустический шум агрегатов; во втором – радиационный фон окружающей среды и спектр шумов в измеряемых сигналах электронного оборудования. Задачи классификации дефектов, оценки их кратности, определения причин и принятия решения о функционировании технической системы могут иметь неограниченное число постановок и алгоритмов их решения. Во всех случаях важным является повышение точности распознавания дефектов, то есть минимизация ошибки распознавания образа $\epsilon_{[X \rightarrow Y]} \rightarrow \min$.

В задачах типологизации дефектов сеть должна отнести каждое наблюдение (*вектор признаков дефекта* – Γ) к одному из нескольких классов дефектов (в общем случае, при неполной и нечеткой информации входного вектора признаков, оценить вероятность принадлежности наблюдения к каждому из классов дефектов). С другой стороны, определенный класс дефектов должен быть соотнесен с *векторами причин и последствий дефектов*, что необходимо для *принятия решения* о дальнейшем функционировании системы. Последняя задача еще более сложна в условиях неполной и нечеткой информации, так как вероятностный ответ не гарантирует корректности реализации принятого решения. Как видно из изложенного материала, задача создания надежной системы диагностирования весьма трудоемка.

Процесс диагностирования схематично можно представить как совокупность систем: 1) *измерительное оборудование* (точки контроля в элементах и структурных связях объекта диагностирования); 2) *преобразовательно-усилительное оборудование* (сборщик, преобразователь, кодировщик, уплотнитель и усилитель диагностической информации); 3) *декодирующее и демодулирующее оборудование*; 4) *логико-вычислительное и накапливающее оборудование* (аппаратное или программно-алгоритмическое обеспечение по обработке диагностической информации и принятию решения, накопители баз данных); 5) *исполнительное и корректирующее оборудование объекта диагностирования*; 6) *теле-аудио-сенсорное оборудование системы отображения диагностической информации*; 7) *оборудование системы самоконтроля диагностических средств*; 8) *коммутирующее и соединительное оборудование*; 9) *средства внешней связи и коммуникаций*. Отсюда вытекает концептуальная постановка задачи о многокритериальном проектировании диагностической системы.

Постановка задачи. При проектировании системы диагностирования и создании ее программно-алгоритмического обеспечения, обязательно должен подвергаться оптимизации ряд показателей, в частности:

- коэффициент глубины поиска дефектов любой кратности

$$K_{г.п.} \rightarrow \max; \quad (1)$$

- число точек контроля элементов и структурных связей

$$N_{т.к.} \rightarrow \min; \quad (2)$$

- ценность диагностической информации (ее объем $R \cup H \subset X$), включая информацию о состоянии внешней среды

$$S_{ц.д.и.}(X, K_{г.п.}/C_{с.д.}) \rightarrow \max; \quad (3)$$

- число признаков, определяющих дефекты ($\Gamma \subset R$)

$$\Gamma \rightarrow \text{mix}; \quad (4)$$

- скорость обработки диагностической информации

$$V_{[X \rightarrow Y]}(X, L) \rightarrow \max; \quad (5)$$

- точность классификации дефектов, их причин и последствий в условиях нечеткой информативности, то есть минимизация ошибки

$$\epsilon_{[X \rightarrow Y]} \rightarrow \min; \quad (6)$$

- объем памяти логико-вычислительного оборудования

$$D_{л.-е.о.} \rightarrow \min; \quad (7)$$

- число правил логического вывода программно-алгоритмического обеспечения, то есть число переходов

$$П(X, Y) \rightarrow \min; \quad (8)$$

- число нейронов в скрытых слоях, или для обычных программ – число констант, переменных и библиотек стандартных программ

$$L(X, Y) \rightarrow \min; \quad (9)$$

- число точек коммутации в диагностической системе

$$N_{т.ком.} \rightarrow \min; \quad (10)$$

- время принятия решения о дальнейшем варианте функционирования системы или корректирующего воздействия

$$t_{п.р.} \rightarrow \min; \quad (11)$$

- времена срабатывания исполнительных и корректирующих устройств

$$t_{реакции.} \rightarrow \min; \quad (12)$$

- энергозатраты на корректирующее воздействие

$$E_{к.е.} \rightarrow \min; \quad (13)$$

- масса системы диагностики

$$M_{с.д.} \rightarrow \min; \quad (14)$$

- стоимость системы диагностики

$$C_{с.д.} \rightarrow \min; \quad (15)$$

- прочие характеризующие показатели

$$\Lambda(\lambda_i, i = \overline{1, I}) \rightarrow \text{extr} . \quad (16)$$

Решение задачи. Данная задача относится к классу многокритериальных задач. Для ее решения можно использовать метод свертки векторного критерия $Q(z) = \{Q_j(z)\}$, $j = \overline{1, J}$ с получением скалярной функции $F_\Sigma(w, Q(z)) = \sum_j w_j Q_j(z)$, имеющей аддитивный критерий оптимальности:

$$F_\Sigma(w, Q(z)) = \max \left\{ \sum_j w_j N_j \right\} , \quad (17)$$

где $N = \{N_1, \dots, N_j\}$ – нормированные коэффициенты частных критериев (1)-(16), которые рассчитываются по известным формулам, а $w = \{w_1, \dots, w_j\}$ – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев, которым при решении предлагается дать точные численные оценки. Математическая реализация обобщенной целевой функции (17) подробно рассмотрена в работах [2,3].

3. Заключение

Приведенные в работе методы и алгоритмы многокритериального проектирования диагностических систем и их программно-алгоритмического обеспечения обладают высокой степенью универсальности и могут быть использованы в любых областях науки и техники, где требуются надежная диагностика и контроль работоспособности технических объектов, систем или изделий.

Работа выполнена при частичной поддержке Отделения Науки НАТО, по программе “Наука для Мира”, грант SfP-973799 Semiconductors.

Литература

- [1] Бушуева М.Е. Методы и алгоритмы обеспечения контролепригодности сложных технических систем при кратных дефектах: Дис. канд. тех. наук 05.13.01/ НГТУ. –Н.Новгород, 1997, 170 с.
- [2] Беляков В.В., Бушуева М.Е., Сагунов В.И. Многокритериальная оптимизация в задачах оценки подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем. –Н.Новгород: НГТУ, 2001, 271 с.
- [3] Бушуева М.Е., Беляков В.В. Диагностика сложных технических систем / Разработка радиационно стойких полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа //Труды 1-го рабочего совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors –Н.Новгород: ТАЛАН, 2001, с.63–98.
- [4] Виттенбург Й. Динамика системы твердых тел. –М.: Мир, 1980, 294 с.
- [5] Ролдугин А.Л., Поляков Н.А. Надежность программного обеспечения встроенной системы диагностирования автомобиля. //Грузовик &. 1999. №6. С.21–22.

- [6] Баршдорф Д. Нейронные сети и нечеткая логика. Новые концепции для технической диагностики неисправностей. //Приборы и системы управления. 1996. №2. С.48–53.
- [7] Шахов А.В., Власов А.И., Кузнецов А.С., Поляков Ю.А. Нейрокомпьютеры: архитектура и реализация. //Приложение к журналу “Информационные технологии”. 2000. №9. 24 с.
- [8] Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. –М.: Горячая линия. Телеком, 2001, 382 с.
- [9] Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Пер. с англ. –М.: Горячая линия. Телеком, 2001, 182 с.

Multi - criteria optimization of complex technical systems check - ability^{†)}

M.E.Bushueva, and V.V.Belyakov¹⁾

*Nizhni Novgorod State Technical University
Minin Street 24, Nizhni Novgorod 603600, Russia*

1. Introduction

Complex systems, including technical ones, require the high-level operational quality and reliability. The increase of the reliability is the replacement of scheduled maintenance for the one on a true operational state basis. The application of this maintenance method requires a wide use of computerized testing and diagnosing. Thus, any object (under technical testing) must have a certain quality that could reliably determine its operational status with minimal cost.

NATO's program SfP-973799 “Semiconductors” is directed to improve the reliability of complex technical semiconductor systems functioning in radiation hard conditions.

The present work contains theoretical aspects of multi-criteria projecting of technical diagnosing systems and their structural interactions. This work is the logical continuation and development of the material given in [3].

2. The generalized concept of defect technical diagnosing multi-criteria projecting with fuzzy information

On the basis of above given material it is claimed that, generally, the diagnosing process schematically can be presented as the sum of systems: 1) measuring equipment (checkpoints in elements structural links of the diagnosed object), 2) transformational and amplifying equipment (collector, transformer, encoder, archiver, and amplifier of diagnostic information), 3) decoding and demodulating equipment, 4) logical calculating and accumulating equipment (hardware or programmable algorithmic equipment for diagnostic data computing and decision making, accumulators of data base), 5) operating and correcting equipment of the diagnosed object, 6) television-audio-sensor equipment of the diagnostic data display system, 7) the equipment of self-control diagnostic means

^{†)} Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop. Nizhni Novgorod, 2002

¹⁾ Phone/Fax: +7-8312-366364; E-mail: amf@adm.nntu.sci-nnov.ru

system, 8) commuting and connecting equipment, 9) means of external communication. Thus, we can set the conceptual task of multi-criteria diagnosing system projecting.

Task setting. When projecting the diagnosing system and creating its programmable and algorithmic provision, we must undergo optimization based on a number of characteristics, in particular, see equations (1)–(16).

- The defect depth search index of any multiplicity (1)
- The quantity of checkpoints of elements and structural interconnections (2)
- The diagnostic information value (its volume $R \cup H \subset X$), including environmental information (3)
- The quantity of defect defining identifications (4)
- Computing speed of diagnostic information (5)
- The defect classification accuracy, their causes and consequences with the fuzzy information that is mistake minimization (6)
- The memory volume of the logical calculating equipment (7)
- The quantity of rules of programmable and algorithmic outputs, the quantity of transitions (8)
- The quantity of neurons in the hidden layers, or the quantity of constants, variables and standard libraries for common programs (9)
- The quantity of commutation points in diagnosing system (10)
- The time of decision taking of the next system function or correction (11)
- The reaction time of the operating and correcting devices (12)
- The energy wasted for the correction (13)
- The diagnosing system mass (14), and cost (15), other characteristics (16).

Solution. This task refers to the multi-criteria ones. To solve it, the method of folding vector criterion $Q(z)=\{Q_j(z)\}$, $j=\overline{1, J}$, with getting scalar function $F_{\Sigma}(w, Q(z))=\sum_j w_j Q_j(z)$ having an additive optimality criterion is used, see eq. (17), where

$N=\{N_1, \dots, N_j\}$ –normalized indexes of partial criteria (1–16), which are calculated according to the known relations, and $w=\{w_1, \dots, w_j\}$ –weight indexes of relative significance partial criteria. Mathematical realization of the generalized purpose function was in detail discussed in [2–3].

3. Conclusion

The above given methods and algorithms of multi-criteria diagnosing system projecting and their programmable and algorithmic provision are universal application and may be successfully used in all branches of science and technology that need the reliable diagnostics and operational check-up.

This work was partially supported by NATO's Scientific Affairs Division in the framework of Science for Peace Program (Project SFP – 973799 Semiconductors).