

Характеристики обнаружения последетекторной межпериодной обработки с обеляющим фильтром

Иван Чухломин, Наиль Файзулин (г. Челябинск)

В статье рассмотрены характеристики обнаружения последетекторной адаптивной межпериодной обработки сигналов в шуме и коррелированной помехе. Определены параметры предпороговой статистики. Установлено, что когерентность сигнала несущественно влияет на характеристики обнаружения.

ВВЕДЕНИЕ

Задача обнаружения сигнала в коррелированной помехе решается в два этапа: «обеление» помехи и затем обнаружение сигнала на фоне белого шума. «Обеление» помехи осуществляется цифровым режекторным фильтром, весовые коэффициенты которого определяются обратной корреляционной матрицей помехи. В реальных условиях корреляционная матрица помехи неизвестна, поэтому производится адаптивная обработка, предполагающая оценку корреляционной матрицы помехи и её обращение [1].

Практическая реализация такой обработки затруднительна, особенно при обработке комплексной входной выборки помехи и сигнала.

Последетекторная межпериодная обработка (МПО) использует выходные сигналы амплитудного детектора, и вычислительные операции производятся с действительными числами, что упрощает реализацию обработки. Структура МПО представляет собой адаптивный матричный обеляющий фильтр (ОФ) и блок скалярного перемножения выходных сигналов фильтра [2].

Целью статьи является определение характеристик обнаружения последетекторной МПО при различных моделях сигнала и помехи.

Модель сигнально-помеховой обстановки

Сигнал и помеха полагаются взаимно-независимыми гауссовыми (до детектора) случайными векторами размерности M с корреляционной матрицей (КМ) межпериодных флуктуаций импульсов пачки M :

- КМ шума:

$$\Phi'_N = \sigma_N^2 \{I_M\}, \text{rank } \Phi'_N = M, \quad (1)$$

где σ_N^2 – мощность шума, $\{I_M\}$ – единичная матрица $M \times M$;

- КМ помехи:

$$\Phi'_P = \sigma_P^2 \{\rho_{ij}\}, \text{rank } \Phi'_P = M, i, j \in M, \quad (2)$$

где σ_P^2 – мощность шума, ρ_{ij} – коэффициент корреляции;

- КМ некогерентного сигнала:

$$\Phi'_S = \sigma_S^2 \{I_M\}, \text{rank } \Phi'_S = M, \quad (3)$$

где σ_S^2 – мощность сигнала;

- КМ когерентного сигнала:

$$\Phi''_S = \sigma_S^2 \{1_{ij}\}, \text{rank } \Phi''_S = 1, i, j \in M. \quad (4)$$

Методика расчётов

Для определения D при заданной величине F производится вычисление закона распределения выходного процесса МПО, который определяется выражением:

$$y = (Hx)^T \times Hx, \quad (5)$$

где x – M -мерный вектор пачки входного процесса ОФ, H – матричная импульсная характеристика (МИХ) ОФ, размерности $M \times M$.

МИХ H определяется из соотношения:

$$H^T \times H = \hat{\Phi}_X^{-1} = \hat{\Psi}_X,$$

и представляет собой «корень» матрицы $\hat{\Psi}_X$, обратной КМ $\hat{\Phi}_X$.

Вычисление $\hat{\Phi}_X$ производится путём расчёта КМ-процесса после амплитудного детектора в соответствии с формулой [3]:

$$r_X(\tau) = \frac{2\sigma_\xi^2}{\pi} \left[\frac{r_\xi(\tau) \arcsin r_\xi(\tau) + \sqrt{1-r_\xi^2(\tau)}}{\pi} \right], \quad (6)$$

где $\sigma_\xi^2, r_\xi(\tau)$ – параметры корреляционной функции процесса на входе амплитудного детектора.

Значения $r_X(\tau)$, взятые при отсутствии сигнала, являются элементами обучающей матрицы $\hat{\Phi}_X$, определяющей МИХ H .

Обнаружение при некогерентном сигнале

Обучающая матрица $\hat{\Phi}_X$ размерности $M \times M$, полученная из Φ'_N в соответствии с (6) имеет вид:

$$\hat{\Phi}_N = \sigma_N^2 \begin{pmatrix} 1 & \frac{2}{\pi} & \dots & \frac{2}{\pi} \\ \frac{2}{\pi} & 1 & \frac{2}{\pi} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{2}{\pi} & \frac{2}{\pi} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

КМ шума на выходе ОФ:

$$W_N = (Hx) \times (Hx)^T = H \times \hat{\Phi}_N \times H^T = \{I_M\}, \quad (8)$$

так как $\hat{\Phi}_N = H^{-1} \times (H^{-1})^T$.

Выход МПО есть сумма квадратов выходных сигналов ОФ. В соответствии с (8) эти сигналы представляют M взаимонезависимых гауссовых величин с нулевым математическим ожиданием и одинаковой единичной дисперсией, и плотность вероятности выходного шума МПО подчиняется χ^2 -распределению [3]:

$$P_N(x, M) = \left[2^{\frac{M}{2}} \times \Gamma\left(\frac{M}{2}\right) \right]^{-1} \times \times x^{\frac{M}{2}-1} \times e^{-\frac{x}{2}}, \quad (9)$$

Где $\Gamma()$ – гамма-функция.

Вероятность ложной тревоги F равна:

$$F = \int_T^{\infty} p_N(x, M) dx, \quad (10)$$

где T – пороговый уровень.

Из (10) следует, что F зависит только от M и T.

Для смеси сигнал + шум:

$$\begin{aligned} \Phi'_{S+N} &= \Phi'_N + \Phi'_S = \\ &= \sigma_N^2 \{I_M\} + \sigma_S^2 \{I_M\} = \\ &= \sigma_N^2 (1+a) \{I_M\} = \\ &= (1+a) \times \Phi'_{N}, \end{aligned}$$

где $a = \sigma_S^2 / \sigma_N^2$ – отношение сигнал / шум, откуда следует, что КМ смеси сигнал + шум равна:

$$\Phi_{S+N} = (1+a) \times \bar{\Phi}_N,$$

таким образом, КМ Φ_{S+N} отличается от $\bar{\Phi}_N$ только величиной дисперсии, увеличенной в $(1+a)$.

КМ смеси сигнал + шум на выходе ОФ равна:

$$\begin{aligned} W_{S+N} &= H \times \Phi_{S+N} \times H^T = \\ &= (1+a) \times H \times \bar{\Phi}_N \times H^T = \\ &= (1+a) \times W_N, \end{aligned} \quad (11)$$

и, следовательно, выходные сигналы ОФ также являются M взаимонезависимыми гауссовыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией $(1+a)$, поэтому плотность вероятности выходного сигнала МПО имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} p_{S+N}(x, M) &= \\ &= \left[2 \times (1+a) \right]^M \times \Gamma\left(\frac{M}{2}\right)^{-1} \times \\ &\times x^{\frac{M}{2}-1} \times e^{-\frac{x}{2(1+a)}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Вероятность правильного обнаружения D равна:

$$D = \int_T^{\infty} p_{S+N}(x, M) dx. \quad (13)$$

Характеристики обнаружения, рассчитанные в соответствии с (13), приведены на рисунке 1.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПРИ КОГЕРЕНТНОМ СИГНАЛЕ

Обучающая матрица Φ_N остаётся без изменений и имеет вид (7), и, следовательно, плотность вероятности выходного шума МПО определяется выражением (9).

Для смеси сигнал + шум:

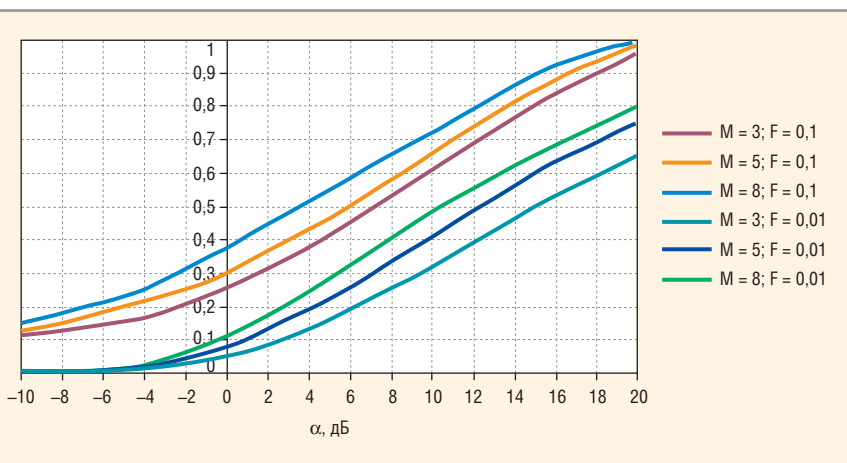


Рис. 1. Характеристики обнаружения (некогерентный сигнал)

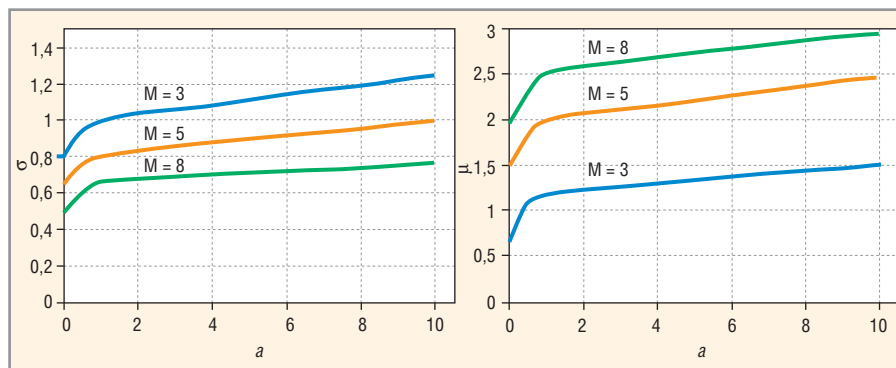


Рис. 2. Параметры распределения $P_{S+N}(X)$

$$\begin{aligned} \Phi''_{S+N} &= \Phi''_N + \Phi''_S = \\ &= \sigma_N^2 \{I_M\} + \sigma_S^2 \{I_{ij}\} = \\ &= \sigma_N^2 (1+a) \begin{pmatrix} 1 & \frac{a}{a+1} & \dots & \frac{a}{a+1} \\ \frac{a}{a+1} & 1 & \dots & \frac{a}{a+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a}{a+1} & \dots & \dots & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате преобразования (6) матрица Φ_{S+N} содержит значения $\pi/2$ в главной диагонали, и значения $(a/(a+1)) \arcsin(a/(a+1)) + \sqrt{1-(a/(a+1))^2}$ для недиагональных элементов. Таким образом, Φ_{S+N} существенно отличается от Φ_N и плотность вероятности смеси сигнал + шум не может быть описана выражением (12).

Аналитическое определение плотности вероятности смеси сигнал + шум на выходе МПО не представляется возможным, и выражения для $p_{S+N}(x, M)$ получены по результатам имитационного моделирования. Обработка результатов моделирования показывает, что плотность вероятности процесса на выходе МПО с высокой степенью точности аппроксимируется логнормальным распределением вида

$$p_{S+N}(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{[\ln x - \mu]^2}{2\sigma^2}\right] \quad (15)$$

с параметрами μ и σ , зависящими от M и a, приведёнными на рисунке 2.

Вероятность ложной тревоги F и пороговый уровень T определяются выражением (10), а вероятность правильного обнаружения D определяется выражением

$$D = \int_T^{\infty} p_{S+N}(x) dx = 1 - \Phi\left(\frac{\ln T - \mu_a}{\sigma_a}\right), \quad (16)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-t^2/2} dt$; μ_a, σ_a – параметры распределения при $a \neq 0$ из рисунка 2.

Характеристики обнаружения, рассчитанные в соответствии с (16), приведены на рисунке 3.

ОБНАРУЖЕНИЕ В КОРРЕЛИРОВАННОЙ ПОМЕХЕ

Обучающая матрица Φ_{N+P} определяется преобразованием (6) КМ Φ'_{N+P} суммы шума с помехой:

$$\begin{aligned} \hat{\Phi}'_{N+P} &= \Phi'_N + \Phi'_P = \sigma_N^2 \{I_M\} + \sigma_P^2 \{\rho_{ij}\} = \\ &= \sigma_N^2 [\{I_M\} + \eta \{\rho_{ij}\}], \end{aligned} \quad (17)$$

где $\eta = \sigma_P^2 / \sigma_N^2$ – отношение помеха / шум, ρ_{ij} – коэффициенты экспоненциальной корреляционной функции.

В результате матрица Φ_{N+P} имеет значения $\pi/2$ в главной диагонали и значения d_{ij} для недиагональных элементов

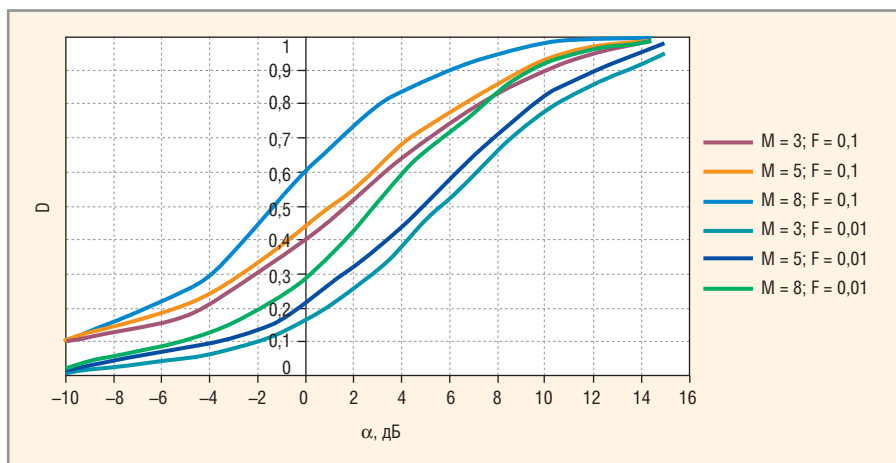


Рис. 3. Характеристики обнаружения (когерентный сигнал)

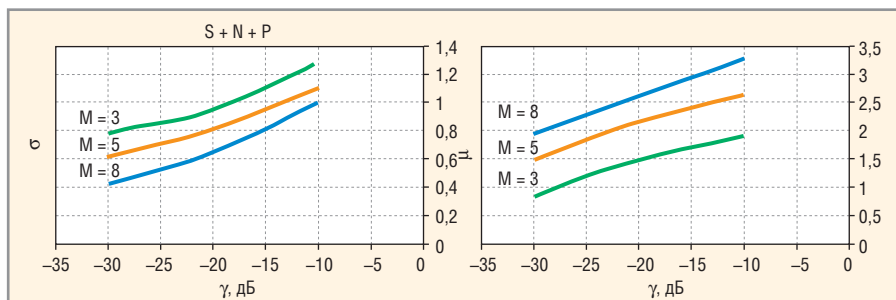


Рис. 4. Параметры распределения $P_{S+N+P}(X)$

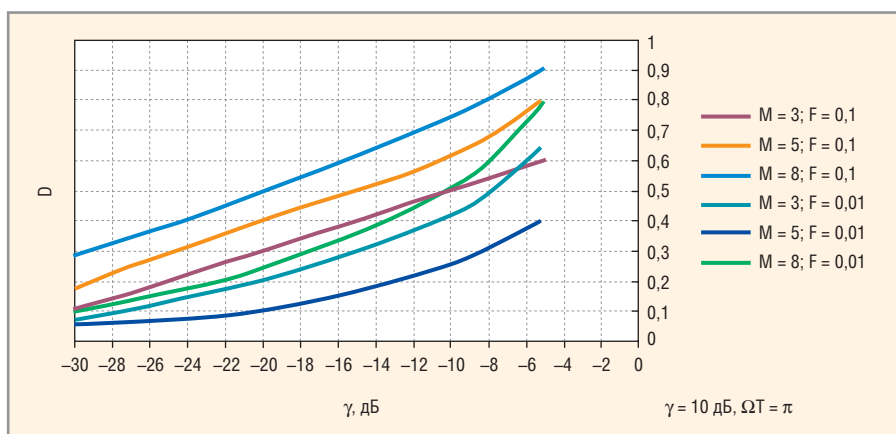


Рис. 5. Характеристики обнаружения (коррелированная помеха)

$$d_{ij} = \frac{\eta\rho_{ij}}{\eta+1} \arcsin\left(\frac{\eta\rho_{ij}}{\eta+1}\right) + \sqrt{1 - \left(\frac{\eta\rho_{ij}}{\eta+1}\right)^2}$$

$$\Phi'_{S+N+P} = \sigma_s^2 \{ \cos((i-j)\Omega T) \} + \sigma_p^2 \{ \rho_{ij} \} + \sigma_n^2 \{ I_M \}, \quad (18)$$

где Ω – разность доплеровских частот помехи и сигнала, T – период зондирования.

В результате преобразования (6) КМ Φ_{S+N+P} имеет значения $\pi/2$ в главной диагонали и значения c_{ij} для недиагональных элементов матрицы:

$$c_{ij} = \frac{a \cos(i-j)\Omega T + \eta\rho_{ij}}{a + \eta + 1} \times \arcsin\left(\frac{a \cos(i-j)\Omega T + \eta\rho_{ij}}{a + \eta + 1}\right) + \sqrt{\left(\frac{a \cos(i-j)\Omega T + \eta\rho_{ij}}{a + \eta + 1}\right)^2}$$

Так как при отсутствии сигнала КМ входного процесса МПО равна КМ Φ_{N+P} , то КМ выходного процесса МПО равна $\{I_M\}$ и закон распределения его имеет вид (9).

В работе [4] показано, что при взаимодействии сигнала с коррелированной помехой когерентность пачки не имеет значения.

КМ смеси сигнал + помеха + шум при $\sigma_p^2 \gg \sigma_s^2$ может быть представлена в виде [5]:

Результаты моделирования показывают, что и в этом случае плотность вероятности процесса на выходе МПО соответствует логнормальному распределению (15) с параметрами μ и β , зависящими от M , a , η , ΩT , ρ_{ij} , γ ($\Omega T = \pi$; $a = 10$ дБ; $\gamma = \sigma_s^2 / \sigma_p^2$; $\rho_{ij} = 0,99^{i-1}$; $M = 3, 5, 8$) и приведёнными на рисунке 4.

Вероятность ложной тревоги F и пороговый уровень T также определяются выражением (10), а вероятность правильного обнаружения D равна:

$$D = \int_T^{\infty} P_{S+N+P}(x) dx = 1 - \Phi\left(\frac{\ln T - \mu_\gamma}{\sigma_\gamma}\right), \quad (20)$$

где μ_γ и β_γ – параметры распределения (15) при $\gamma \neq 0$ из рисунка 4.

Характеристики обнаружения, рассчитанные в соответствии с (20) приведены на рисунке 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последетекторная МПО с обеслаивающим фильтром обеспечивает обнаружение сигнала в коррелированной помехе.

Отличительными особенностями последетекторной МПО является стабильный уровень ложных тревог, не зависящий от параметров распределения шума и помехи, и не критичность к когерентности сигнала.

Последнее обстоятельство особенно важно для радиолокационных станций с некогерентными сигналами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бартевев В.Г. Квазиоптимальные адаптивные алгоритмы обнаружения сигналов. Современная электроника. 2011. №2.
2. Леховицкий Д.И., Кириллов И.Г., Бурковский С.И. Особенности междупериодной обработки сигналов на фоне пассивных помех в некогерентных импульсных РЛС. Журнал радиоэлектроні і комп'ютерні системи. 2005. №2 (10). С. 51–57. www.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/REKS/2005/REKS205/pdf/Lehovick.pdf.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. М. Радио и связь. 1982. С. 624.
4. Морская радиолокация. Под ред. Винокурова В.И. Л. Судостроение. 1986. С. 256.
5. Чухломин И.Е., Файзуллин Н.А. Эффективность некогерентной междупериодной обработки на основе обеслаивающего фильтра. IX Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь». ИРЭ РАН. Москва. 2015.

Новости мира News of the World Новости мира

«Микран» получила положительные заключения от Минобороны РФ

Главный научный метрологический центр Министерства обороны Российской Федерации провёл экспертизу документации и материалов испытаний для утверждения типа анализаторов цепей скалярных P2M-18A, P2M-04A и P2M-40.

Согласно данной экспертизе установлено, что анализаторы цепей соответствуют требованиям ГОСТ 22261-94, ГОСТ 16423-78, МИ 1700-87, военной поверочной схемы для средств измерений КСВН и фазы коэффициента отражения (ВПС-25), всех технических условий и могут быть использованы в области обороны и безопасности государства.

ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России отмечает, что анализаторы цепей метрологически обеспечены как при серийном выпуске, так и в процессе эксплуатации силами и средствами региональных центров метрологии Минобороны России.

В результате было дано положительное заключение экспертизы документации и материалов испытаний. Тип анализаторов цепей скалярных P2M-18A, P2M-04A и P2M-40 зарегистрирован в разделе Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений в области обороны и безопасности государства.

www.micran.ru

Первая очередь завода «Совтест АТЕ» сдана в эксплуатацию

18 января 2017 г. компанией «Совтест АТЕ» был получен Единый государственный реестр прав на недвижимое имущество и сделок с ним, подтверждающий государственную регистрацию права собственности ООО «Совтест АТЕ» на первые три корпуса нового завода, строящегося в городе Курске по адресу ул. Карла Маркса, 135. Также 18 января 2017 г. компания объявила о сдаче в эксплуатацию и начале работы в полную мощность нескольких производственных цехов предприятия: слесарно-сборочного и механообрабатывающего участка, участка по сборке жгутов, участка поверхностного монтажа и микроэлектроники, а также офисно-складских помещений. В настоящее время налажено серийное производство светодиодных светильников, шкафов сухого хранения и высокоточных тестеров для промышленного оборудования.

Строительство завода по производству высокоточных датчиков и систем на основе МЭМС-технологий осуществляется ком-

панией «Совтест АТЕ» с 2015 г. Новый завод станет одним из самых современных. На нём запланировано серийное производство высокоточных МЭМС-компонентов (акселерометров $\pm 30g$, инклинометров $\pm 30^\circ$, гироскопов, высокочастотных микроэлектромеханических переключателей) и систем мониторинга различного назначения (в том числе систем мониторинга инженерных конструкций). Кроме того, в линейке продукции, которую пла-

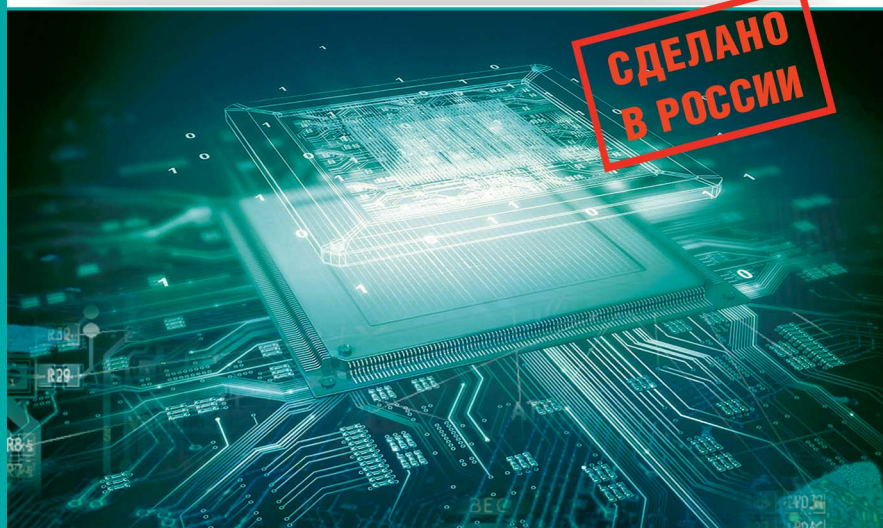
нирует выпускать компания «Совтест АТЕ», холтер-монитор – портативный электрокардиограф. Учитывая неутешительную статистику смертности от сердечно-сосудистых заболеваний в России, выведение такого прибора на рынок особенно актуально для поддержания здоровья людей.


Выход завода на проектную мощность запланирован на 2018 г.

www.sovtest.ru

EREMEX
Иновационный подход к проектированию электроники

САПР электроники



 **DeltaDesign** — система сквозного проектирования электронных устройств на базе печатных плат

- Менеджер библиотек LIBerty
- Схемотехнический редактор FlexyS
- Схемотехническое моделирование SimOne
- HDL-симулятор Simtera
- Ведение правил DRM
- Редактор печатных плат RightPCB
- Топологический трассировщик TopoR
- Коллективная работа "Workgroups"
- Для предприятий "Enterprise server"

WWW.DD.RU

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ПОСТАВЩИК ПРОДУКЦИИ EREMEX

PROSOFT[®]

Тел.: (495) 234-0636 • info@prosoft.ru • www.prosoft.ru



Реклама