

УДК 621.391, 621.372

Использование результатов анализа многоканального обнаружителя для оценки помехоустойчивости рангового демодулятора

Бельтюков С.В.^{1*}, Филатов В.И.^{2}, Борукаева А.О.^{2***}, Бердигов П.Г.^{2****}**

¹*Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, ул. Карбышева, 8, Балашиха, Московская область, 143900, Россия*

²*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия,*

**e-mail: Stm99@mail.ru*

***e-mail: yfil10@mail.ru*

****e-mail: alexbmstu.b@yandex.ru*

*****e-mail: palber96@gmail.com*

Аннотация

Для решения задачи обнаружения полезного сигнала на фоне шумов были исследованы характеристики многоканальных обнаружителей. Предложено использование рангового демодулятора для обеспечения высокой помехоустойчивости каналов связи. Для оценки данной характеристики были использованы результаты анализа многоканального обнаружителя. Из исследования зависимости эквивалентной вероятности ошибки на бит информации от отношения сигнал/шум делается вывод о преимущественном использовании рангового демодулятора. Для его использования предложена схема, реализующая вычисление взаимных рангов. Представлены расчетные формулы: вероятности ошибки, вероятности суммарного ранга в сигнальном канале и совместной вероятности шумовых рангов с учетом распределения огибающей для случая общей ранжировки

массива из kM отсчетов огибающей. А также представлены зависимости вероятности ошибки на бит информации для рангового демодулятора. Делается вывод о том, что ранговый демодулятор с общей ранжировкой по всему массиву отсчетов имеет лучшие показатели помехоустойчивости.

Ключевые слова: сигнал, помехоустойчивость, ранговый демодулятор, многоканальный обнаружитель, отношение сигнал/шум, вероятность ошибки, огибающая.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам повышения качества функционирования каналов связи и управления, особенно на бортах летательных аппаратов. Помимо полезных сигналов на входе приемных устройств радиосистем передачи данных, которые используются при построении систем летательных аппаратов, действуют самые разнообразные помехи, затрудняющие, а иногда делающие невозможным прием полезных сигналов. Задача обнаружения известного сигнала на фоне шума соответствует случаю известного вектора параметров сигнала, что обычно не характерно для систем радиопередачи информации на этапе обнаружения, однако решение этой задачи полезно с методической точки зрения, поскольку позволяет исследовать многоканальный обнаружитель и дает возможность получить потенциальные характеристики обнаружителя, что важно для оценки качества реальных схем обнаружения.

Актуальность особенно подчеркивается на фоне все более частых попыток обнаружения полезного сигнала среди шумов на летательных аппаратах. Высокая помехоустойчивость может быть достигнута благодаря анализу характеристик рангового демодулятора. Особое внимание стоит обратить на ранговый демодулятор с общей ранжировкой.

Актуальность темы затрагиваемой работы прежде всего обоснована не только необходимостью обнаружения полезного сигнала, но и поиском наиболее выгодного способа нахождения этого сигнала.

1. Оценка помехоустойчивости рангового демодулятора

Высокая помехоустойчивость каналов связи и управления, функционирующих в условиях радиоподавления, может быть достигнута в том числе за счет анализа характеристик рангового демодулятора.

Для оценки помехоустойчивости рангового демодулятора могут быть использованы результаты анализа многоканального обнаружителя. В качестве исходных данных при расчете использовались вероятности превышения сигнального отсчета шумом, определяемые выражением (1):

$$P_n = 1 - P_0 = \int_0^{\infty} W\left(\frac{x}{\theta} > 0\right) \int_0^x W\left(\frac{y}{\theta} = 0\right) dy dx. \quad (1)$$

В данном случае фиксированное значение P_n (1) соответствует широкому классу различных сигнально – помеховых комбинаций, а при отсутствии помех находится в однозначном соответствии с отношением сигнал/шум на входе демодулятора. Следовательно, результатов подобного сравнения достаточно для выводов о

качестве сравниваемых устройств. Основные результаты представлены в виде графиков на рис. 1. Для установления соответствия между вероятностью ошибки P_n и отношением сигнал/шум при отсутствии помех можно воспользоваться графиком рис.2, определяющим вероятность ошибки при некогерентном различении двоичных сигналов. Помимо вывода о преимуществе ранговой схемы результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что с ростом числа каналов и числа накоплений происходит общее снижение вероятности ошибки для широкого класса сигнально – помеховых комбинаций. Это в свою очередь дает возможность более полно использовать избыточность по частоте, присущую сложным сигналам.

Если скорость переключения частот в радиоканале R_h , а ширина полосы, отведенной для перестройки частоты F , то общее число возможных частотных позиций для сигнала при плотной расстановке равно $N = F/R_h$, с перекрытием $2F/R_h$. При использовании в качестве информационной модуляции МЧТ¹ одна f_1 несет $k = \log_2 M$ бит информации. Только при $N=M$ диапазон частот, отведенный для сигнала, используется полностью. При дополнительном n - кратном разнесении по частоте одного информационного символа скорость передачи информации в канале равна $R_u = kR_h/n$. Таким образом, если положить $k = n = \log_2 M$, то пропорционально увеличивая k и n , можно, сохраняя постоянной R_u , увеличивать степень использования частотной избыточности.

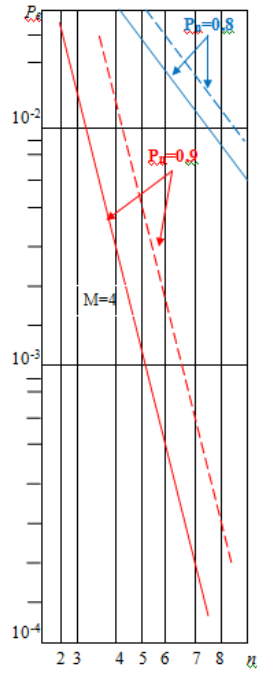


Рисунок 1. Графики вероятности превращения сигнального отсчета шумом.

----- Результаты для устройства с накоплением локальных решений

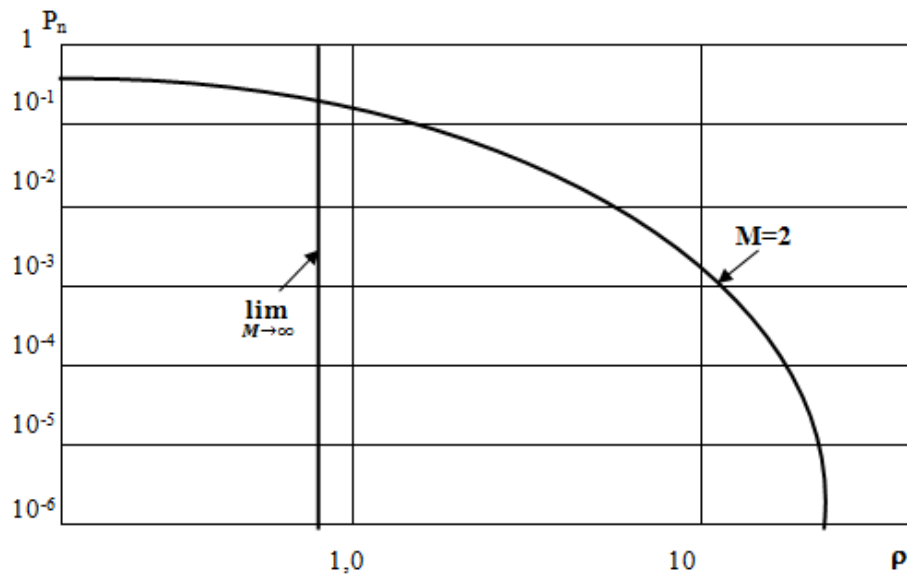


Рисунок 2. График, определяющий вероятность ошибки при некогерентном различении двоичных сигналов.

Базу такого сигнала можно представить в виде (2):

$$B = \frac{kN}{2\log_2 M} = \frac{F}{2R_n} \quad (2)$$

Имеется реальная возможность использовать всю избыточность по частоте при небольших N . Ограничением в этом случае выступают технические возможности по реализации многоканальных схем. На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости $P_{б.э}$ от P_e , в соответствии с соотношением (3):

$$P_{б.э} = 1 - \sqrt[n]{1 - P_e} \quad (3)$$

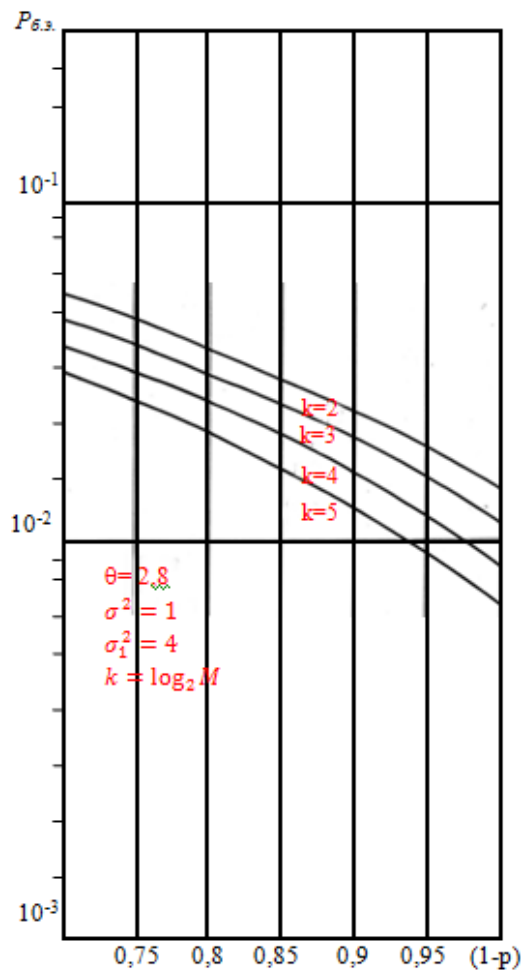


Рисунок 3. Графики зависимости $P_{б.э}$ от P_e

для двух фиксированных сигнально - помеховых ситуаций, характеризующихся следующими показателями (4):

$$\theta = 2,8, \sigma^2 = 1, \sigma_1^2 = 4 \quad \text{и} \quad \theta = 5, \sigma^2 = 1, \sigma_1^2 = 10. \quad (4)$$

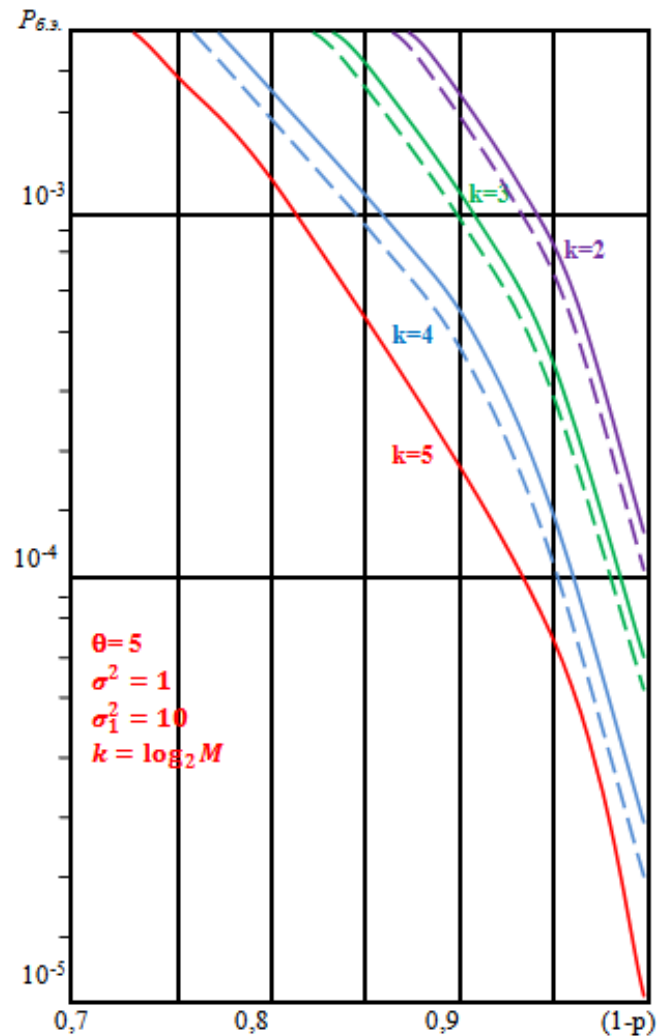


Рисунок 4. График зависимости эквивалентной вероятности ошибки на бит информации от отношения сигнал/шум.

На рис.4 представлены зависимости эквивалентной вероятности ошибки на бит информации от отношения сигнал/шум. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения в таком варианте рангового демодулятора.

2. Анализ схемы, реализующей вычисление взаимных и перекрестных рангов

Дальнейшим развитием предлагаемого варианта демодулятора может служить схема, реализующая вычисление взаимных рангов не только для каждого t_i

момента времени $i = \overline{1, n}$, а и перекрестные ранги, т.е. ранги между отсчетом в j -ом канале в i -ый момент времени и отсчетом k -го канала в l -ый момент времени. Это требует обязательного наличия памяти у демодулятора, позволяющей запомнить nM отсчетов и вычислителя, позволяющего произвести вычисление и накопление nM взаимных рангов.

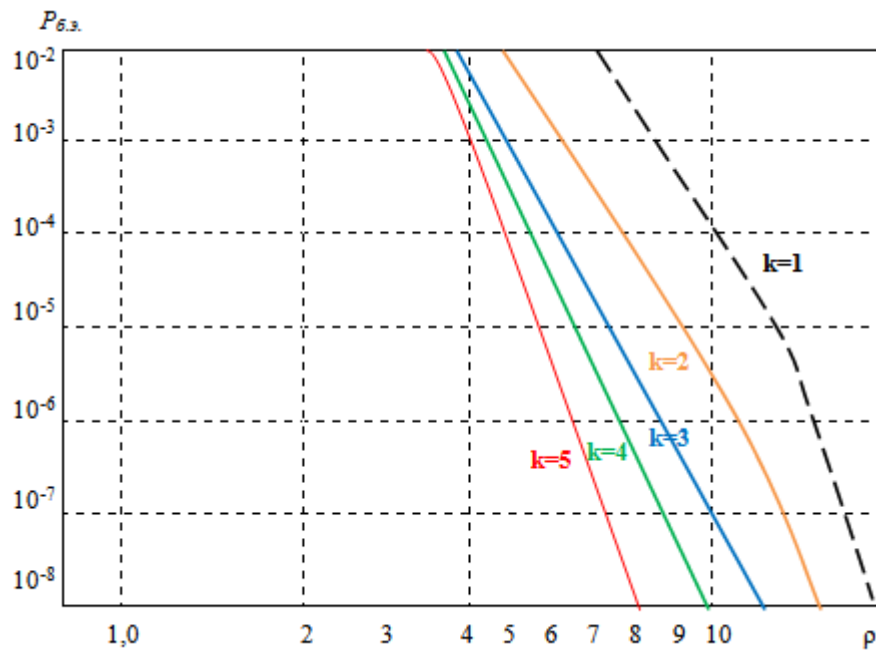


Рисунок 5. Графики зависимости эквивалентной вероятности ошибки на бит информации.

----- для рангового демодулятора.

Для случая общей ранжировки массива из kM отсчетов огибающей для соответствующих частотно-временных позиций необходимо, в конечном счете, найти распределение вероятностей значений суммарных рангов в сигнальном и шумовых каналах. Если значения сигнальных отсчетов в одном из испытаний расположились в порядке возрастания (x_1, x_2, \dots, x_k) , а шумовые отсчеты разместись следующим образом: до x_1 - x_0 , между x_1 и x_2 - i_1 последний после x_k - i , причем

$i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k = k(M - 1), i_0, i_1, i_2, \dots, i_k \in [0, k(M - 1)]$, то соответствующие ранги для
сигнального канала равны

$$C_1 = i_0 + 1, C_2 = C_1 + (i_1 + 1), \quad C_k = C_{k-1} + (i_{k-1} + 1),$$

а сумма $\Sigma_c = \sum_{i=1}^k C_i$.

Совместная вероятность появления этих рангов равна (5):

$$W_c(c_1, c_2, \dots, c_k / k, M) = k! C_{k(M-1)}^{i_0, i_1, \dots, i_k} \int_0^\infty \dots \int_0^\infty W_c(x_1, x_2, \dots, x_k) \left(\int_0^\infty W_{uu}(y) dy \right)^{i_0} \times$$

$$\times \left(\int_{x_1}^{x_2} W_{uu}(y) dy \right)^{i_1} \dots \left(\int_{x_k}^\infty W_{uu}(y) dy \right)^{i_k} d x_1 d x_2 \dots d x_k \quad (5),$$

Выражение $C_{k(M-1)}^{i_0, i_1, \dots, i_k}$ находится из выражения (6):

$$C_{k(M-1)}^{i_0, i_1, \dots, i_k} = \frac{[k(M-1)]!}{i_0! i_1! \dots i_k!} \quad (6)$$

Следовательно, вероятность того, что суммарный ранг в сигнальном канале будет Σ_c равна (7):

$$P_c\left(\frac{\Sigma_c}{k, M}\right) = \sum_{i_0, i_1, \dots, i_k=1}^{k(M-1)} W_c\left(c_1, c_2, \dots, c_k / k, M\right), \quad \sum_{i=1}^k c_i = \Sigma_c, \quad (7)$$

причем $\Sigma_c \in \left\{ \frac{(1-k)k}{2}, \frac{(2Mk-k+1)k}{2} \right\}$.

Совместная вероятность шумовых рангов $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$, равна (8):

$$P_{u_i}(\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_k / k, M) = \frac{1 - P_c(\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_k / k, M)}{C_{k(M-1)}^k}. \quad (8)$$

Тогда вероятность того, что шумовой канал наберет суммарный ранг

$\Sigma u_i = \sum_{i=1}^k u_i$ равна

$$P_{u_i}(\Sigma u_i / k, M) = \sum_{\substack{i_0, i_1, \dots, i_{k-1} \\ \sum_{i=1}^k u_i = \Sigma u_i}}^{k(M-1)} \frac{1 - P_c(\varpi_1, \varpi_2, \dots, \varpi_k / k, M)}{C_{k(M-1)}^k}, \quad (9)$$

причем

$$\Sigma u_i \in \left\{ \frac{(1+k)k}{2}, \frac{(2Mk-k+1)}{2} \right\}.$$

Вероятность ошибки можно представить в виде

$$P_e = \sum_{\Sigma c=1}^{k-M} \left\{ P_c \left(\Sigma c / k, M \left[\sum_{\Sigma u = \Sigma c}^{kM} P(\Sigma u / k, M) \right]^{M-1} \right) \right\}. \quad (10)$$

С учетом распределения огибающей эти вероятности можно записать в виде

(11), (12), (13):

$$P_c \left[c_1, c_2, \dots, c_k / k, M \right] = k! C_{k(M-1)}^{i_0, i_1, \dots, i_k} M_c \left\{ \left[\varphi(x_1) \right]^{i_0} \left[\varphi(x_2) - \varphi(x_1) \right]^{i_1} \dots \left[1 - \varphi(x_k) \right]^{i_k} \right\}, \quad (11)$$

$$P_{u_i} \left(\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_k / k, M \right) = \frac{k! [k(M-2)]!}{[k(M-1)]!} - \frac{[k!]^2 [k(M-2)]!}{i_0! i_1! \dots i_k!} M_c \{ \bullet \} \quad (12)$$

$$M_c \{ \bullet \} = \left[P_n^{i_0} |_{1-P_n} |_{0^{i_0+i_1+i_2+\dots+i_k}} \right] \left[P_n^{i_0+i_1} |_{1-P_n} |_{2^{i_2+i_3+i_4+\dots+i_k}} \right] P_n^{i_0+i_1+i_2+\dots+i_{k-1}} |_{1-P_n} |_{k}$$

$$M_c [\varphi(x)] = \int_0^\infty W(x/\vartheta > 0) \left[\int_0^x W(y/\vartheta = 0) dy \right] dx. \quad (13)$$

Графики зависимости эквивалентной вероятности ошибки на бит информации для данного типа демодулятора, представлены на рис.5 (штриховая линия).

Заключение

Сравнительный анализ помехоустойчивости рассмотренного ранее рангового демодулятора и рангового демодулятора с общей ранжировкой по всему массиву отсчетов показывает некоторое преимущество последнего, однако оно представляется не столь значительным и с учетом больших вычислительных затрат и общего снижения быстродействия может быть рекомендован только для низкоскоростных модемов.

Библиографический список

1. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. - М: Радио и связь, 2003. - 640 с.
2. Солонина А.И., Улахович Д.А. Линейные дискретные системы. – СПб: Санкт-Петербург Государственный университет телекоммуникаций, 2005. - 75 с.
3. Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.И. и др. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. - М.: Советское радио, 1973. – 424 с.
4. Тузов Г.И., Козлов М.Р. Помехозащищенность систем связи, использующих сигналы с псевдослучайной перестройки рабочей частоты // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 3. С. 19 - 32.

5. Баулин П.З., Кобелев М.А., Куприянов А.И. К оценке помехозащищенности радиосистем с широкополосными сигналами // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 1. С. 42 – 46.
6. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
7. Самойленко В.И. Грубрин И.В. Адаптивная фильтрация помех в многоканальных системах с пространственной и временной обработкой // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 1988. № 4. С. 64 - 68.
8. Кузнецов А.Б., Попов В.Д., Шавин А.С., Иванов А.А. Способ передачи информации с использованием помехоустойчивого кодирования. Патент РФ № 2553068 от 15.05.2015.
9. Баталов Л.В., Жуковский М.И., Киричек Р.В., Лазарев Б.Н. Механизмы и последствия преднамеренных электромагнитных воздействий на передачу данных // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). С. 103 – 108.
10. Банкет В.Л., Ляхов А.И. Применение сверточных кодов в системах связи с фазовой манипуляцией // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 8. С. 3 – 23.
11. Окунев Ю.Б. Цифровая передача информации фазомодулированными сигналами. – М.: Радио и связь, 1991. – 296 с.
12. Пенин П.И. Системы передачи цифровой информации. – М.: Советское Радио, 1976. – 364 с.

13. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
14. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
15. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Советское радио, 1978. – 320 с.
16. Петраков О. Моделирование радиоприема в условиях шумов и помех // Радио. 2003. № 4. URL: http://www.radioway.ru/2003/04/modelirovanie_radiopriema_v_uslovijah_shumov_i_pomeh.html
17. Большов О.А., Куприянов А.И. Пороговые сигналы в каналах передачи и утечки информации, передаваемой с помощью широкополосных модемов // Труды МАИ. 2001. № 4. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34676>
18. Чикин А.В. Метод быстрого обнаружения и оценки псевдослучайных сигналов в широкополосных системах связи // Труды МАИ. 2003. № 13. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34446>
19. Осипов Н.А., Шавин А.С., Тарасов А.Г. Методика идентификации помех, действующих в канале передачи информации робототехнических систем // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=81085>
20. Bychenkov S., Mikhailov V., Sakaniwa K. Fast acquisition of PN sequences in DS/CDMA systems // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2002, vol. E85-A, no. 11, pp. 2498 - 2520.