

УДК 621.391.372

Б. И. Шахтарин, А. В. Черныш

**АНАЛИЗ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ПОИСКА
ШУМОПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ
С ОДНИМ ПОГЛОЩАЮЩИМ СОСТОЯНИЕМ**

Рассмотрены модифицированные представления систем поиска в виде направленных графов с одним поглощающим состоянием и штрафом за ложные тревоги. На основе аппарата марковских цепей, а также теории направленных графов и порождающих функций выведены передаточные функции систем поиска для их модифицированного представления, а также проведен детальный анализ эффективности выбранных систем поиска шумоподобных сигналов. Показано, что представление системы поиска в виде направленного графа с одним поглощающим состоянием позволяет получить приблизительные оценки оптимального времени анализа одной ячейки области неопределенности сигнала по критерию минимального среднего времени поиска до успешного обнаружения сигнала.

Ключевые слова: передача информации, широкополосные сигналы, обнаружение сигналов, марковские цепи, направленные графы.

В настоящее время во многих разработках для систем беспроводной передачи информации применяются шумоподобные или, как их еще называют, широкополосные сигналы (ШПС). В наши дни системы с ШПС получили широкое распространение [1–7]. Они позволяют снизить плотность энергии, за счет этого на их основе построены системы спутниковой навигации (GPS) и связи [8]. Устойчивость этих систем к помехам и интерференции позволила применить их для построения современных сетей передачи информации, в том числе с множественным доступом (CDMA, WCDMA, Wi-Fi).

Бурное развитие систем беспроводной передачи информации, а также перегруженность каналов связи наряду с ростом требований к скорости передачи данных и безопасности — все это делает применение ШПС практически безальтернативным. В то же время в ряде работ [4–7] отмечается необходимость создания и реализации новых, быстроедействующих и высокоэффективных алгоритмов обработки ШПС, отвечающих возросшему спросу на услуги беспроводной широкополосной связи. В частности, это относится к алгоритмам синхронизации. Точная и надежная временная синхронизация является краеугольным камнем работы всех систем связи с расширенным спектром [1, 3, 4], а скорость решения этой задачи определяет рабочие характеристики системы. Существуют различные способы формирования ШПС, один из них — на основе свертки потока данных с псевдослучайной

последовательностью (ПСП). Подробное описание ШПС и методов их формирования можно найти в работах [1–9]. Известно [1, 4, 9], что для выделения информации из принятого ШПС необходимо иметь точную синхронизированную копию ПСП, которую передатчик использовал для формирования сигнала. Для этого необходимо устранить неопределенность по времени задержки ШПС (осуществить поиск по времени), вызванную неопределенностью в расстоянии между передатчиком и приемником. Для достижения точной синхронизации по окончании поиска начинается процесс слежения за задержкой. Таким образом, поиск можно рассматривать как этап грубой синхронизации, результатом которого является введение рассогласования по времени в раскрыв дискриминационной характеристики системы слежения.

Сравнение эффективности систем поиска. В работе [10] предложен алгоритм верификации результатов поиска ШПС, позволяющий повысить рабочие характеристики системы предварительной синхронизации. Исследование статистических характеристик предложенного алгоритма и их сравнительный анализ отражены в работе [11].

Согласно изложенным в работе [12] принципам, для сравнения эффективности предложенной схемы поиска была выбрана классическая система двухэтапного поиска ШПС (double-dwell). Следует особо отметить, что привлечение систем поиска с большим числом ступеней обнаружения нецелесообразно, так как анализ принятой смеси $y(t) = s(t) + n(t)$ сигнала $s(t)$ и шума $n(t)$ в двух ячейках области неопределенности [3, 9] для системы верификации осуществляется параллельно [10, 11], в то время как многоступенчатые системы обнаружения дают выигрыш в ОСШ за счет времени накопления принятой смеси в течение различных временных отрезков, т.е. корреляция осуществляется последовательно. Как следствие, асимптотическое значение среднего времени поиска [11] для систем более высокого порядка будет существенно больше.

Среднее время поиска $\langle T \rangle$ является одной из важнейших характеристик работы системы поиска ШПС. На рис. 1 приведен график зависимости данного показателя [1–3, 9, 10] от ОСШ для следующих параметров системы: относительный порог $\Pi = 0,5$, время анализа на первом этапе $T_1 = 50$, на втором этапе $T_2 = 300$ (этап верификации для системы [10] и второй этап для системы двухэтапного поиска), число ячеек области неопределенности $m = 2048$. Следует отметить, что результаты, представленные в работе [11], были получены с учетом равенства $T_1 = T_2$ для каждой системы.

Однако следует учитывать, что полученные результаты отражают случай системы с двумя поглощающими состояниями (F — состояние ложной тревоги; H — состояние успешного завершения поиска). На рис. 2 показан направленный граф двухэтапной системы поиска ШПС [11], где α и β — вероятности ложной тревоги и пропуска при

анализе каждой ячейки неопределенности на первом этапе, α' и β' — вероятности ложной тревоги и пропуска на втором этапе [3].

Как отмечалось в работе [11], при вычислении среднего времени перехода системы из начального состояния S в состояние H нужно пренебречь путями графа, ведущими в F (т.е. положить $\alpha \ll 1$, так как согласно свойству поглощающих марковских цепей [1, 13], попав в F , система не сможет его покинуть и среднее время поиска будет равно бесконечности. Тогда показатель качества работы системы будет комплексным, поиск завершится в состоянии H с вероятностью P_d , среднее время, затраченное на поиск, будет равно

$$\langle T \rangle = \left. \frac{dH(z)}{dz} \right|_{z=1}, \quad (1)$$

где $H(z)$ — передаточная функция графа переходов системы из состояния S в H .

Предположение $\alpha \ll 1$, позволяющее пренебречь ветвями графа, ведущими в F , справедливо для каждой из рассматриваемых систем.

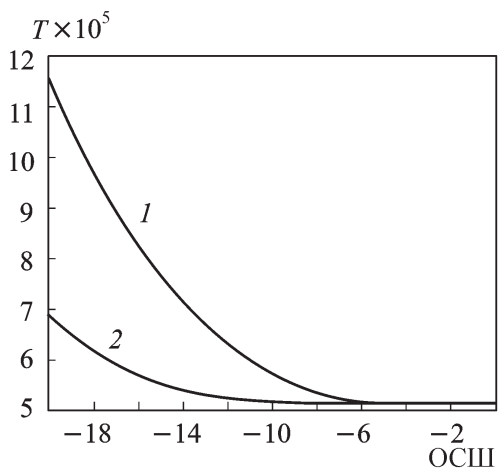


Рис. 1. Зависимость среднего времени поиска от ОСШ:
1 и 2 — система поиска двухэтапного и с верификацией соответственно

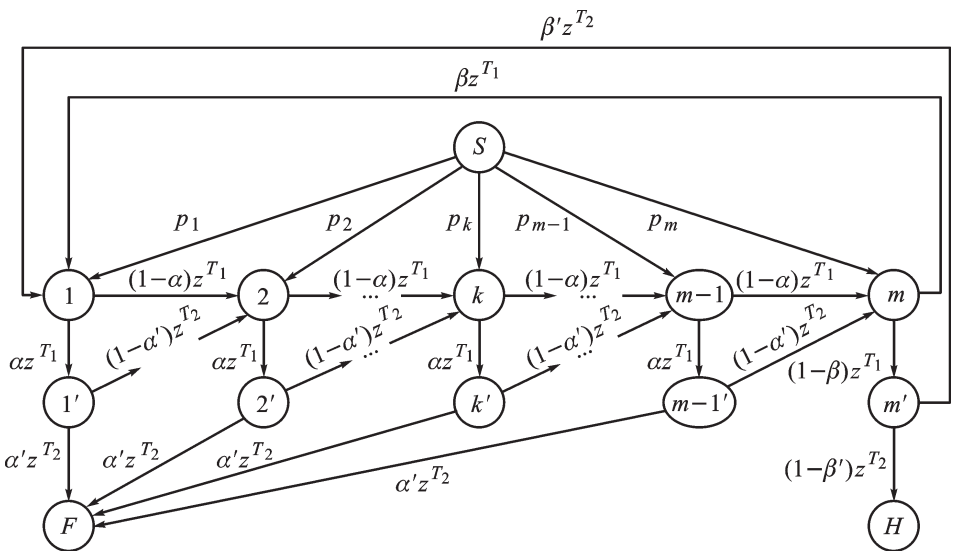


Рис. 2. Направленный граф системы с двухэтапным поиском

Вероятность ложной тревоги α вычисляется по формуле из работы [9]:

$$\alpha = 0,5 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left[\Pi \sqrt{\frac{N\rho^2}{(1+\rho^2)}} \right] \right\}, \quad (2)$$

где Π – нормированный порог обнаружения, $N = T/T_0$ (T – длительность анализа одной ячейки, T_0 – длительность элементарного сигнала ШПС), ρ^2 – ОСШ по мощности, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-v^2) dv$ – функция Крампа.

Вероятность пропуска β определяется из соотношения

$$(1 - \beta) = 0,5 \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[(1 - \Pi) \sqrt{N\rho^2} \right] \right\}. \quad (3)$$

Данный подход к сравнительному анализу среднего времени поиска эффективен для случая, когда системы поиска имеют одинаковые характеристики вероятности успешного завершения поиска P_d . Как показано в работе [10], зависимости P_d от ОСШ различаются для системы с верификацией и системы двухэтапного поиска при одинаковом наборе параметров. Таким образом, для корректного сравнения необходимо модифицировать модели системы так, чтобы они обеспечивали равные значения P_d во всем диапазоне ОСШ. Наиболее эффективным способом является преобразование направленных графов систем поиска с исключением поглощающего состояния F и введением временного штрафа T_p за ложное обнаружение сигнальной ячейки.

Модель системы поиска ШПС с одним поглощающим состоянием. На рис. 3 представлена модель системы двухэтапного поиска в

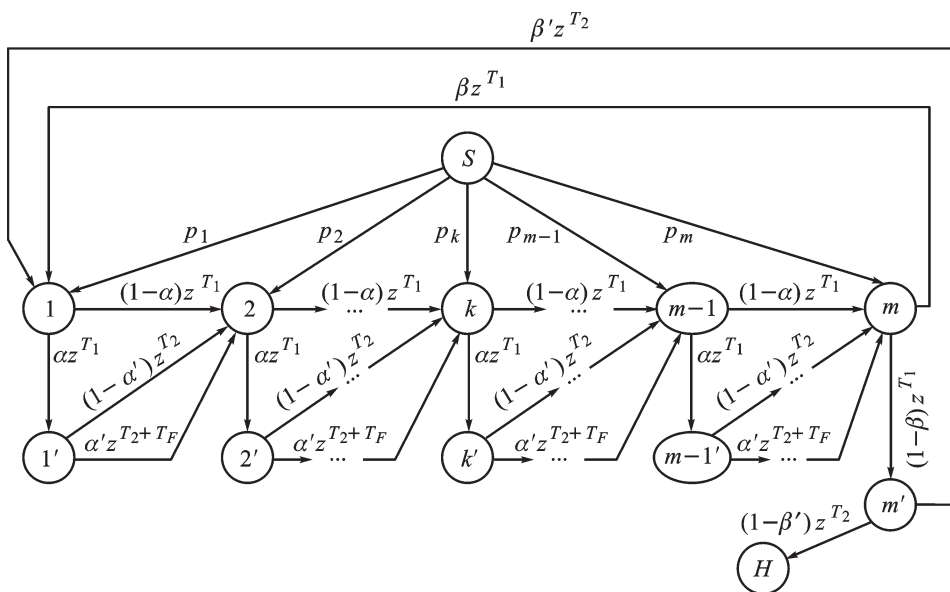


Рис. 3. Модифицированный граф системы двухэтапного поиска

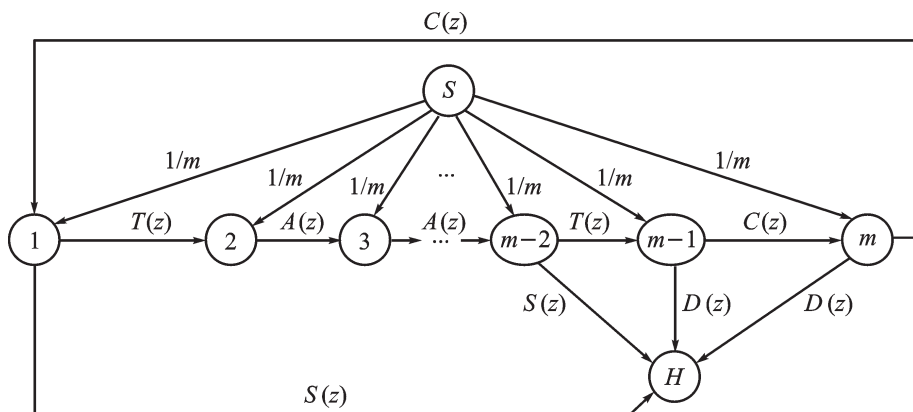


Рис. 4. Модифицированный граф системы поиска с верификацией

виде направленного графа с одним поглощающим состоянием и дополнительными путями, соответствующими штрафу за ложное обнаружение. Время T_p требуется системе синхронизации для установления факта отсутствия синхронизма и возвращения на этап поиска.

Для данного представления системы поиска целесообразно рассматривать лишь среднее время до успешного завершения поиска, так как по свойству поглощающих марковских цепей финальная вероятность успешного завершения поиска $P_d = 1$ для любых параметров системы.

На рис. 4 приведен упрощенный модифицированный граф системы поиска с верификацией, для которого введены обозначения:

$$\begin{aligned}
 A(z) &= (1 - \alpha)z^{T_1} + \alpha z^{T_1}((1 - \alpha')^2 z^{T_2} + (2\alpha' - \alpha'^2)z^{T_2+T_p}); \\
 C(z) &= \beta z^T + (1 - \beta)(1 - \alpha)\beta z^{2T}; \\
 D(z) &= (1 - \beta)(1 - \beta + \alpha\beta)z^{2T}; \quad S(z) = \alpha(1 - \beta)z^{2T}; \\
 T(z) &= (1 - \alpha)z^{T_1} + \alpha z^{T_1}(\beta'(1 - \alpha')z^{T_2} + \beta'\alpha'z^{T_2+T_p}).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Далее, согласно изложенной в работах [1, 3, 9, 11, 12, 14] методике, можно получить передаточные функции графов из начального состояния S в состояние H и вычислить зависимость среднего времени поиска от ОСШ, используя выражение (1).

На рис. 5 представлены результаты моделирования среднего времени поиска ШПС системами, которые описываются графами, показанными на рис. 3, 4.

Из представленных результатов видно, что система поиска с верификацией демонстрирует лучшее, в сравнении с системой двухэтапного поиска, среднее время поиска до успешного обнаружения ШПС с заданными параметрами.

Метод для определения оптимального значения времени анализа ячейки. В ходе проектирования системы синхронизации ШПС необходимо определить ряд ключевых параметров системы. Один из них — время анализа одной ячейки области неопределенности ШПС.

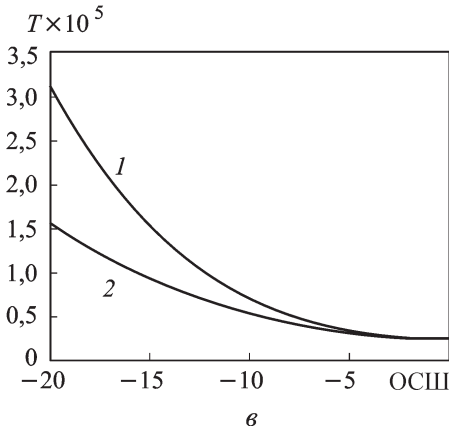
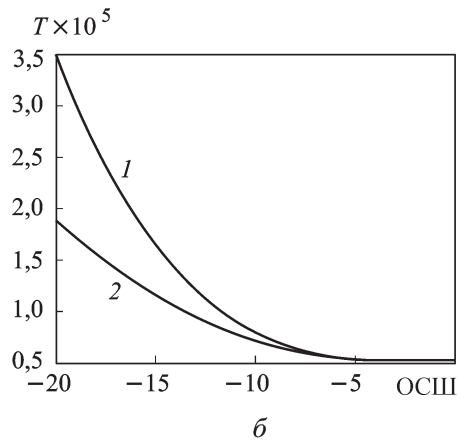
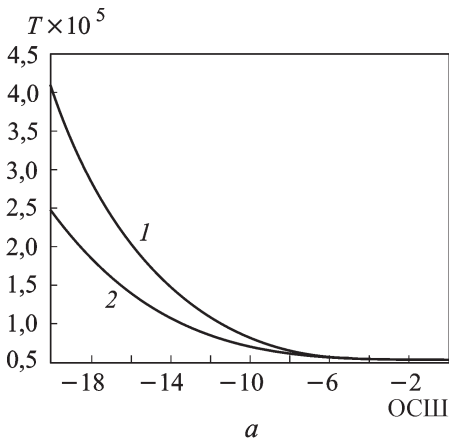


Рис. 5. Зависимость среднего времени поиска от ОСШ ($m = 2048, N = 0,5$):
 1 — система двухэтапного поиска, 2 — система поиска с верификацией;
 $T_1 = 50$ (а, б); 25 (в); $T_2 = 300$ (а, б); 200 (в); $T_p = 1024$ (а);
 256 (б, в)

Применительно к системам, рассматриваемым в настоящей работе, можно вести речь о временах T_1 и T_2 . Как правило, эти параметры выбираются такими, чтобы обеспечить определенный уровень вероятности ложной тревоги α и вероятности пропуска β . Процедура выбора определяется соотношениями (2), (3). Тем не менее, указанные параметры поиска можно определить, исходя из требования минимизации среднего времени поиска при фиксированных остальных параметрах системы. Следует оговориться, что предложенная методика применима только для представления систем поиска в виде направленного графа с одним поглощающим состоянием и штрафами за ложное обнаружение ШПС. Суть предложенного метода заключена в следующем:

— при недостаточно высоком значении среднего времени поиска велика вероятность ложной тревоги, и, как следствие, система поиска с большей вероятностью попадет на ветвь графа, содержащую штраф z^{T_p} , что приведет к существенному увеличению среднего времени поиска $\langle T \rangle$;

— при чрезмерно высоких значениях T_1 и T_2 выигрыш в ОСШ и, как следствие, уменьшение α и β будут нивелироваться, в то же время среднее время $\langle T \rangle$ возрастет за счет большего времени анализа каждой ячейки области неопределенности.

Изложенные принципы позволяют сделать вывод о возможности выбора некоего оптимального значения для T_1 и T_2 с точки зрения минимизации среднего времени поиска. Как уже говорилось, данную процедуру следует проводить для фиксированных параметров системы — T_p, Π, m . Как правило, разработчики системы синхронизации имеют априорные данные, позволяющие задать эти значения. На рис. 6 приведены зависимости среднего времени поиска $\langle T \rangle$ от времени анализа на первом этапе для системы с верификацией и системы двухэтапного поиска. Для упрощения в ходе моделирования было принято, что $T_2 = 5T_1$.

Из анализа приведенных зависимостей очевидно, что можно приблизительно определить длительность анализа на первом этапе, минимизирующее среднее время поиска. Ту же процедуру можно применить для получения оптимального значения T_2 . Выбирая несколько значений ОСШ, можно задать искомые параметры так, что они будут удовлетворять различным условиям работы системы поиска.

Выводы. Проведено сравнительное исследование системы поиска ШПС с верификацией и двухэтапной системы поиска. Показано, что для различных значений длительности анализа принятой смеси сигнала и шума на первом и втором этапах система поиска с верификацией имеет лучшие характеристики среднего времени поиска.

Исходя из необходимости эффективного сравнения двух систем в условиях равенства финальных вероятностей успешного завершения поиска, были введены модифицированные модели систем в виде направленных графов с одним поглощающим состоянием и штрафами за ложное обнаружение ШПС. При помощи теории марковских цепей

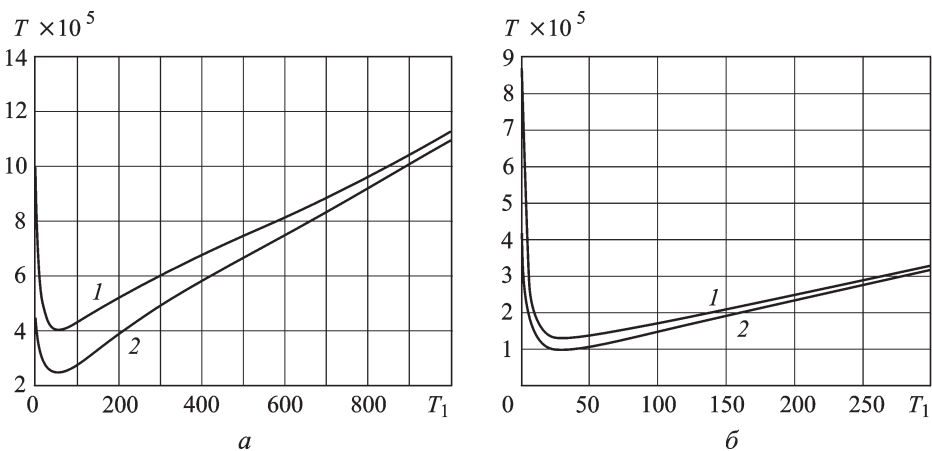


Рис. 6. Зависимость среднего времени поиска от T_1 $m = 2048, N = 0,5; T_p = 1024$, ОСШ = 20 (а) и 14 дБ (б): 1 — система двухэтапного поиска, 2 — система поиска с верификацией

были получены зависимости среднего времени поиска для модифицированных представлений сравниваемых систем. Было показано, что в условиях равенства всех параметров систем и финальных вероятностей успешного завершения поиска существенный выигрыш в среднем времени поиска до обнаружения ШПС дает система поиска с верификацией.

Учитывая практическую необходимость определения параметров поиска, оптимизирующих тот или иной показатель работы системы, была предложена методика выбора времени анализа каждой ячейки области неопределенности, минимизирующая среднее время поиска. Продемонстрирована возможность применения данного подхода при проектировании систем поиска ШПС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jack K. Holmes. Coherent spread spectrum systems. – N.Y.: John Wiley & Sons, 1982.
2. Simon M. K., Omura J. K., Scholtz R. A., Levitt B. K. Spread spectrum communications. Computer Science Press, Inc., Rockville, Md., 1985.
3. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. / Под ред. А.В. Назаренко – М.: Вильямс, 2003. – 1099 с.
5. Schilling D. L., et. al. Spread Spectrum for Commercial Communications // IEEE Communications Magazine, April, 1991. – P. 66–78.
6. Петров Е. П., Усков А. А., Частиков А. В. Прием дискретных коррелированных сигналов: Учеб. пособие. – Киров: ВятГТУ, 1998. – 134 с.
7. Milstein L. B., Simon M. K. Spread spectrum communications. Mobile communications handbook, CRC Press LLC, 1999.
8. Spread spectrum acquisition and tracking performance for Shuttle communication link / Waddah K. Alem, Gaylord K. Huth, Jack K. Holmes, Sergei Udalov // IEEE Transactions on Communications. – Vol. COM-26. – No. 11. November 1978.
9. Журавлев В. И. Поиск и синхронизация в широкополосных системах. – М.: Радио и связь, 1986. – 240 с.
10. Шахтарин Б. И., Черныш А. В. Алгоритм верификации результатов поиска шумоподобных сигналов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”. – 2006. – № 2(63). – С. 67–78.
11. Шахтарин Б. И., Черныш А. В. Исследование статистических характеристик систем поиска шумоподобных сигналов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Приборостроение”. – 2008. – № 2.
12. Черныш А. В. Практическая реализация алгоритма верификации результатов поиска ШПС // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия “Радиофизика и радиотехника” – 2006. – № 107. – С. 126–131.
13. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
14. Шахтарин Б. И. Случайные процессы в радиотехнике. – М.: Радио и связь, 2002. – 568 с.

Статья поступила в редакцию 26.02.2008

Борис Ильич Шахтарин родился в 1933 г., окончил в 1958 г. Ленинградскую Военно-воздушную инженерную академию им. А.Ф. Можайского и в 1968 г. ЛГУ. Д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники РФ. Автор более 200 научных работ, в том числе 4 книг, в области анализа и синтеза систем обработки сигналов.



B.I. Shakhhtarin (b. 1933) graduated from the Leningrad Air Force Engineering Academy n.a. A. F. Mozhaysky in 1958 and from Leningrad State University in 1968. D. Sc. (Eng.), professor of the Bauman Moscow State Technical University. USSR State Prize winner, RF Honoured Worker of science and technology. Author of more than 200 publications, among them 4 books, in the field of analysis and synthesis of signal processing systems.

Александр Викторович Черныш родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Аспирант кафедры “Автономные информационные и управляющие системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области формирования и поиска широкополосных сигналов.

A.V. Chernysh (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2006. Post-graduate of “Autonomous Information and Control Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of some publications in the field of generation and acquisition of spread spectrum signals.

В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга

Норенков И.П.

Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов / И.П. Норенков. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.

В четвертом издании учебника даны сведения по различным аспектам и видам обеспечения систем автоматизированного проектирования, необходимые квалифицированным пользователям САПР в разных областях техники. Значительное внимание уделено математическому обеспечению процедур анализа и синтеза проектных решений, используемых на различных этапах проектирования. Рассмотрены состав и функции технического обеспечения САПР, методики концептуального проектирования сложных систем, технологии информационной поддержки изделий (CALS-технологии), а также вопросы интеграции САПР с автоматизированными системами управления в промышленности.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов высших технических учебных заведений. Может быть полезен аспирантам и работникам промышленности, использующим методы и средства САПР в своей работе.

По вопросам приобретения обращаться по тел. (499) 263-60-45;
e-mail: press@bmstu.ru