

Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта

На правах рукописи

Штомпель Николай Анатольевич

УДК 621.391

**МЕТОДЫ СВЕРТОЧНОГО КОДИРОВАНИЯ И ДЕКОДИРОВАНИЯ
ДАНЫХ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА БЫСТРОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ**

Специальность 05. 12. 02 – Телекоммуникационные системы и сети

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Приходько Сергей Иванович
кандидат технических наук, доцент

Харьков – 2010

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| | |
| РАЗДЕЛ 1. Анализ методов сверточного кодирования и декодирования данных | 10 |
| 1.1. Основные сведения из теории сверточных кодов..... | 10 |
| 1.2. Анализ вычислительной сложности методов сверточного кодирования и декодирования данных..... | 13 |
| 1.3. Анализ методов представления сверточных кодов в виде блоковых кодов..... | 20 |
| 1.4. Преобразование Фурье в конечных полях Галуа..... | 22 |
| 1.5. Анализ алгоритмов быстрого преобразования Фурье в конечных полях Галуа..... | 25 |
| 1.6. Постановка задач на исследование..... | 29 |
| Выводы..... | 30 |
| | |
| РАЗДЕЛ 2. Разработка методов сверточного кодирования данных на основе быстрых алгоритмов | 32 |
| 2.1. Анализ метода алгебраического представления сверточных кодов во временной области..... | 32 |
| 2.2. Разработка метода алгебраического представления сверточных кодов в частотной области..... | 37 |
| 2.3. Разработка методов сверточного кодирования данных на основе быстрых алгоритмов..... | 42 |
| 2.3.1. Разработка метода сверточного кодирования данных на основе алгоритма Агарвала-Кули вычисления свертки | 42 |
| 2.3.2. Разработка метода сверточного кодирования данных на основе алгоритма Винограда быстрого преобразования Фурье | 51 |
| Выводы..... | 60 |

| | |
|--|------------|
| РАЗДЕЛ 3. Разработка метода алгебраического декодирования сверточных кодов на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье..... | 62 |
| 3.1. Анализ метода алгебраического декодирования сверточных кодов во временной области..... | 62 |
| 3.2. Разработка метода алгебраического декодирования сверточных кодов в частотной области..... | 68 |
| 3.3. Обоснование применения алгоритма Винограда быстрого преобразования Фурье для уменьшения вычислительной сложности разработанного метода декодирования..... | 78 |
| Выводы..... | 90 |
| | |
| РАЗДЕЛ 4. Оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов и рекомендации относительно технической реализации.... | 92 |
| 4.1. Оценка вычислительной сложности алгоритмов частотного сверточного кодирования и декодирования данных | 92 |
| 4.1.1. Оценка вычислительной сложности алгоритма частотного сверточного кодирования данных | 92 |
| 4.1.2. Оценка вычислительной сложности алгоритма частотного алгебраического декодирования сверточных кодов | 96 |
| 4.2. Техническая реализация сверточных кодеров и декодеров на основе разработанных алгоритмов..... | 102 |
| Выводы..... | 116 |
| | |
| ВЫВОДЫ..... | 117 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ..... | 120 |
| Приложение А. Структурная схема и технические характеристики цифрового сигнального процессора TMS320C6416Т..... | 132 |
| Приложение Б. Акты реализации результатов диссертационной работы..... | 134 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время теории помехоустойчивого кодирования известно несколько методов кодирования и декодирования данных, которые обеспечивают работу вблизи пропускной способности канала связи. Среди этих методов можно выделить турбо- и турбоподобные коды, которые на данном этапе активно развиваются. Однако указанные методы характеризуются значительной вычислительной сложностью, а это ограничивает их практическое применение в современных высокоскоростных телекоммуникационных системах [1-5]. В связи с этим возникает проблема поиска более простых и менее затратных при практической реализации методов кодирования и декодирования данных. Учитывая тенденцию постоянного роста скоростей обмена данными, этот вопрос приобретает большую актуальность. Сверточные коды, хотя и обеспечивают менее высокий энергетический выигрыш кодирования по сравнению с турбокодами, тем не менее находят широкое применение в разнообразных системах передачи данных: в системах беспроводной связи, в цифровых наземных и спутниковых системах связи и вещания, в системах связи с дальним космосом и др. [1-4, 6-23]. В то же время внедрение сверточных кодов с большой длиной кодового ограничения позволяет повысить достоверность передаваемых данных, но это связано со следующими трудностями: сложность построения «хороших» кодов и высокая вычислительная сложность методов кодирования, а особенно, декодирования данных [24-31].

Такие проблемы как ограниченность пропускной способности каналов связи, увеличение потоков передаваемых данных, необходимость достоверной передачи данных, рост времени обработки данных в кодере и декодере (кодеке) требуют разработки новых эффективных методов сверточного кодирования и декодирования в телекоммуникационных системах.

Значительный вклад в исследование вопросов теории помехоустойчивого кодирования, в частности сверточного кодирования и декодирования данных, внесли российские и украинские ученые: Зигангиров К.Ш., Золотарев В.В., Овечкин Г.В., Кудряшов Б.Д., Приходько С.И., Банкет В.Л. Среди зарубежных ученых, которые решали задачи в области сверточного кодирования, необходимо отметить: Элайеса П., Форни Г.Д., Возенкрафта Д., Фано Р., Месси Дж., Блейхута Р.

Таким образом, исследования относительно разработки и усовершенствования методов сверточного кодирования и декодирования данных с уменьшенной вычислительной сложностью касаются актуальной проблемы дальнейшего развития теории помехоустойчивого кодирования.

Связь с научными программами, планами, темами.

Исследования диссертационной работы выполнялись в соответствии со следующими нормативными актами:

1) Концепция Национальной программы информатизации, одобренная Законом Украины «Про Концепцію Національної програми інформатизації» от 4 февраля 1998 г. № 75/ 98-ВР;

2) Концепция развития связи Украины до 2010 года, утвержденная постановлением Кабинета Министров Украины «Про Концепцію розвитку зв'язку України до 2010 року» от 9 декабря 1999 г. № 2238;

3) Концепция создания Государственной интегрированной информационной системы обеспечения управления подвижными объектами (связь, навигация, наблюдение), одобренная распоряжением Кабинета Министров Украины от 17 июля 2003 г. № 410-р.;

4) Концепция развития телекоммуникаций в Украине, одобренная распоряжением Кабинета Министров Украины от 7 июня 2006 г. № 316-р.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка методов, направленных на снижение вычислительной сложности сверточного кодирования и декодирования данных и повышение скорости их обработки в кодере и декодере.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи.

1. Проанализировать методы сверточного кодирования и декодирования данных, алгоритмы быстрого вычисления свертки и быстрого преобразования Фурье (БПФ) в конечных полях и оценить их вычислительную сложность.

2. Разработать метод алгебраического представления сверточных кодов в частотной области, который основан на описании информационной, обобщенной порождающей и кодовой последовательностей в виде их Фурье-образов.

3. На основе алгоритмов быстрого вычисления свертки Агарвала-Кули и БПФ Винограда разработать методы сверточного кодирования данных, направленные на снижение вычислительной сложности кодера.

4. На основе представления процесса декодирования в частотной области и применения алгоритма БПФ Винограда разработать метод алгебраического декодирования сверточных кодов, который обеспечивает уменьшение вычислительной сложности декодера.

5. На основе предложенных методов сверточного кодирования и декодирования данных разработать алгоритмы, оценить их вычислительную сложность и осуществить сравнение с существующими алгоритмами.

6. Разработать программную и программно-аппаратную реализации разработанных алгоритмов сверточного кодирования и декодирования данных и обосновать практические рекомендации относительно их технической реализации.

Объектом исследования являются процессы сверточного кодирования и декодирования данных.

Предметом исследования являются методы сверточного кодирования и декодирования данных с уменьшенной вычислительной сложностью.

Методы исследования. Разработка методов сверточного кодирования и декодирования данных проведена с применением методов теории

помехоустойчивого кодирования, теории конечных полей Галуа, теории чисел и теории цифровой обработки сигналов. Оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов проведена с использованием методов теории сложности. Разработка практических рекомендаций по реализации предложенных алгоритмов сверточного кодирования и декодирования данных проведена с использованием методов теории цифровых автоматов.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в следующем.

1. Получил дальнейшее развитие метод алгебраического представления сверточных кодов в виде не двоичных блоковых циклических кодов, который отличается от известного описанием информационной, обобщенной порождающей и кодовой последовательностей сверточного кода в виде их Фурье-образов и позволяет разработать новые методы сверточного кодирования и декодирования данных с меньшей вычислительной сложностью.

2. Впервые на основе алгоритмов вычисления свертки Агарвала-Кули и БПФ Винограда разработаны методы сверточного кодирования данных, позволяющие снизить вычислительную сложность кодера.

3. Усовершенствован существующий метод алгебраического декодирования сверточных кодов, отличающийся от известного представлением процесса декодирования в частотной области и применением алгоритма БПФ Винограда; предложенный метод декодирования уменьшает вычислительную сложность декодера за счет сокращения необходимого количества арифметических операций.

Практическое значение полученных результатов исследований диссертационной работы заключается в следующем.

1. На основе предложенного метода сверточного кодирования данных разработан алгоритм, имеющий в 1,2 - 3,8 раза меньшую вычислительную сложность по сравнению с существующим алгоритмом сверточного кодирования данных во временной области, при фиксированных параметрах

сверточного кода. На основе предложенного метода алгебраического декодирования сверточных кодов разработан алгоритм, вычислительная сложность которого в 1,3 - 2,6 раза меньше, чем у существующего алгоритма декодирования сверточных кодов во временной области, при фиксированных параметрах сверточного кода.

2. Разработаны программная и программно-аппаратная реализации предложенных алгоритмов сверточного кодирования и декодирования данных, позволяющие обеспечить работу кодека при скорости передачи данных в канале связи соответственно 12 Мбит/с и 500 Мбит/с.

3. Разработаны практические рекомендации относительно технической реализации алгоритмов частотного сверточного кодирования и декодирования данных. Для уменьшения вычислительной сложности кодера сверточных кодов с входной длиной кодового ограничения $r \geq 32$ предлагается использовать разработанный алгоритм сверточного кодирования данных, а для снижения вычислительной сложности декодера сверточных кодов с входной длиной кодового ограничения $r \geq 8$ – предложенный алгоритм декодирования данных. Алгоритм БПФ Винограда необходимо реализовать в виде оптимизированного программного кода для цифрового сигнального процессора (ЦСП). Для обеспечения работы сверточного декодера при скорости передачи данных по каналу связи свыше 500 Мбит/с предлагается аппаратно реализовать алгоритм Берлекэмпа-Месси и рекуррентное продолжение синдрома, а также применить параллельную версию алгоритма БПФ Винограда.

4. Полученные результаты использованы на производстве при разработке специального математического и программно-аппаратного обеспечения изделия, выполненного в рамках исследовательско-конструкторской работы «Жанр-РС-ШШС», в ЦККБ «Протон» (акт реализации от 16.07.2010 г.) и в учебном процессе Украинской государственной академии железнодорожного транспорта (акт реализации от 10.02.2010 г.).

Личный вклад автора. Все результаты, изложенные в диссертационной работе, автором получены лично. В научных работах, которые выполнены в соавторстве и опубликованы в изданиях, которые входят в перечень ВАК Украины, автору принадлежат: в [100] - предложенный метод алгебраического представления сверточных кодов в частотной области; в [102] - усовершенствованный метод алгебраического декодирования сверточных кодов; в [103] - разработанный метод сверточного кодирования данных на основе быстрого алгоритма свертки Агарвала-Кули.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и были одобрены на:

- пятой и шестой научных конференциях Харьковского университета Воздушных сил имени Ивана Кожедуба (г. Харьков, 2009, 2010 гг.);

- девятой международной научно-технической конференции «Проблемы информатики и моделирования» НТУ «ХПИ» (г. Харьков, 2009 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы изложены в 8 публикациях, из них 5 статей в научных изданиях [100-104], которые входят в перечень ВАК Украины, и 3 тезиса докладов на научно-технических конференциях [105-107].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; [пер. с англ. Д.Д. Кловский, Б.И. Николаев]; под ред. Д.Д. Кловского. - М: Радио и связь, 2000.- 800 с.
2. Скляр Бернад. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Бернад Скляр; [пер. с англ. Е.Г. Гроза, В.В. Марченко, А.В. Назаренко, О.М. Ядренко]; под ред. А.В. Назаренко. – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Вернер М. Основы кодирования: [учебник для ВУЗов] / М. Вернер; [пер. с нем. Д.К. Зигангиров]. – М.: Техносфера, 2004. – 288 с.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса; [пер. с англ. В.Б. Афанасьева]. – М.: Техносфера, 2005. – 319 с.
5. Олифер В.Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: [учебник для ВУЗов] / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – [4-е изд.]. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.
6. Возенкрафт Дж. Теоретические основы техники связи / Дж. Возенкрафт, И. Джекобс; пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина. – М.: Мир, 1969. – 640 с.
7. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон; пер. с англ. под ред. Р.Л. Добрушина, С.И. Самойленко.– М.: Мир, 1976.– 576 с.
8. Теория кодирования / Т. Касами, Н. Токура, Е. Ивадари, Я. Инагаки; пер. с японского А.В. Кузнецова; под ред. Б.С. Цыбакова, С.И. Гельфанда. – М.: Мир, 1978. – 576 с.
9. Витерби А.Д. Принципы цифровой связи и кодирования / А.Д. Витерби, Дж. К. Омура; пер. с англ. под ред. К.Ш. Зигангирова. – М.: Радио и связь, 1982. – 535 с.
10. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах

цифровой связи / Дж. Кларк, мл., Дж. Кейн; пер. с англ. С.И. Гельфанда; под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

11. Зигангиров К. Ш. Процедуры последовательного декодирования / К.Ш. Зигангиров. - М.: Связь, 1974. - 208 с.

12. Злотник Б. М. Помехоустойчивые коды в системах связи / Б.М. Злотник. - М.: Радио и связь, 1989. - 232 с.

13. Месси Дж. Пороговое декодирование / Дж. Месси [пер. с англ. Ю.Л. Сагаловича]; под. ред. Э.Л. Блоха. - М.: Мир, 1966. - 207 с.

14. Возенкрафт Д. Последовательное декодирование / Д. Возенкрафт, Б. Рейффен; пер. с англ. Р.Л. Добрушина. - М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1963.- 156 с.

15. Золотарёв В.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / В.В. Золотарёв, Г.В. Овечкин; под. ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 126 с.

16. Никитин Г. И. Сверточные коды: [учеб. пособие] / Г. И. Никитин. - СПб.: СПбГУАП, 2001. - 80 с.

17. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки / Р. Блейхут; [пер. с англ. В.В. Грушко, В.М. Блиновского]; под. ред. К.Ш. Зигангирова. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

18. Elias P. Error-free coding / P. Elias // IEEE transactions on information Theory. – 1954. - Vol. 4, № 4. - PP. 29–37.

19. Viterbi A. J. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm / A. J. Viterbi // IEEE transactions on information theory. – 1967. - Vol. 13, № 2. - PP. 260–269.

20. Зигангиров Д.К. Последовательное синдромное декодирование сверточных кодов над большими алфавитами / Д.К. Зигангиров, К.Ш. Зигангиров// Проблемы передачи информации. – 1991.– Т. 27, № 2. - С. 92–96.

21. Зигангиров К.Ш. Недвоичное сверточное кодирование в канале с преднамеренными помехами / К. Ш. Зигангиров, С. А. Попов, В. В. Чепыжов // Проблемы передачи информации. – 1995. – Т.31, № 2. - С. 84–101.

22. Moon Todd K. Error correction coding: mathematical methods and algorithms. / Todd K. Moon. - New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 804 p.
23. Purser M. Introduction to error-correcting codes. / M. Purser. – London: Artech house, Inc., 1995. – 133 p.
24. Kabatiansky G. Error correcting coding and security for data networks: Analysis of the superchannel concept. / G. Kabatiansky, E. Krouk, S. Semenov. – Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. - 278 p.
25. Pretzel O. Error-correcting codes and finite fields / O. Pretzel. – Oxford: University Press, 1992 – p. 398.
26. Sweeney P. Error control coding: from theory to practice / P. Sweeney. - Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002. – p. 242.
27. Moreira J.C. Essentials of error-control coding / J.C. Moreira, P.G. Farrell. - Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2006. – p. 361.
28. Johannesson R. Fundamentals of convolutional coding / R. Johannesson, K. Sh. Zigangirov. – New Jersey: IEEE Press, Inc, 1999. – p. 428.
29. Lin S. Error control coding: fundamentals and applications / S. Lin, D.J. Costello, Jr. – New Jersey: Prentice-Hall, 1983. – p. 603.
30. Blahut R.E. Algebraic codes for data transmission / R.E. Blahut. - New York: Cambridge University press, 2003. – p. 482.
31. Blahut R.E. Algebraic codes on lines, planes and curves / R.E. Blahut. - New York: Cambridge University press, 2008. – p. 543.
32. Форни Д. Каскадные коды / Д. Форни; [пер. с англ. под ред. С.И. Самойленко] – М.: Мир, 1970. – 207с.
33. Блох Э.Д. Линейные каскадные коды / Э.Д. Блох, В.В. Зяблов. – М.: Наука, 1982. – 229 с.
34. Блох Э.Д. Обобщенные каскадные коды / Э.Д. Блох, В.В. Зяблов.– М.: СВЯЗЬ, 1976. – 240 с.
35. Алгебраические сверточные коды: [учебное пособие] / [Н.И. Данько, С.П. Евсеев, А.А. Кузнецов и др.]. - Харьков: УкрГАЗТ, 2007. – 238

с.

36. Трифонов П.В. Информатика. Построение и анализ алгоритмов [Электронный ресурс] / П.В. Трифонов. - СПб., 2007. – с. 95. – Режим доступа: <http://dcn.infos.ru/~petert/fastalgorithms.pdf>

37. Панкратьев Е.В. Алгебраические алгоритмы и их сложность: [конспекты спецкурса] [Электронный ресурс] / Е.В. Панкратьев, А.Е. Панкратьев. – М., 2006. – 156 с. – Режим доступа: <http://shade.msu.ru/~pankrat/book1.pdf>

38. Ахо А.В. Структуры данных и алгоритмы: [учеб. пособие] / А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт, Д.Д. Ульман; пер. с англ. и редакция А.А. Минько - М.: Вильямс, 2000. - 384 с.

39. Грэхем Р. Конкретная математика. Основание информатики / Р. Грэхем, Д. Кнут, О. Паташник; пер. с англ. Б.Б. Походзея, А.Б. Ходулева; под. ред. А.Б. Ходулева. - М.: Мир, 1998. - 703 с.

40. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман; пер. с англ. А.О. Слисенко, под ред. Ю.В. Матиясевича. - М.: Мир, 1979. - 535 с.

41. Кормен Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест; пер. с англ. под ред. А. Шеня. - М.: МЦНМО, 2002. - 960 с.

42. Кнут Д.Э. Искусство программирования: в 4 т. / Д. Э. Кнут; [пер. с англ. под общ. ред. Ю. В. Козаченко]. – [3-е изд., испр. и доп.]. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – Т. 2. Получисленные алгоритмы. - 832с.

43. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов / В.В.Воеводин. -М.: Изд-во МГУ, 2006. - 112 с.

44. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В.В.Воеводин, Вл.В. Воеводин - СПб.: БХВ-Петербург, 2002. - 608 с.

45. Кудряшов Б. Д. Блочные коды, получаемые из сверточных / Б. Д. Кудряшов, Т. Г. Захарова // Проблемы передачи информации. – 1989. – Т. 25, №4. – С. 98 – 102.

46. Кудряшов Б.Д. Декодирование блоковых кодов, получаемых из сверточных / Б.Д. Кудряшов // Проблемы передачи информации. – 1990. – Т. 26, №2. – С. 18 – 26.
47. Кудряшов Б.Д. Применение алгоритма Витерби для декодирования сверточных кодов в системе с решающей обратной связью / Б.Д. Кудряшов // Проблемы передачи информации. – 1984. – Т. 20, №2. – С. 18 – 26.
48. Зяблов В.В. Сравнение сложности декодирования усеченных сверточных и блочных кодов / В.В. Зяблов, С.А. Шавгулидзе // Проблемы передачи информации. – 1984. – Т. 20, № 1. – С. 105 – 109.
49. Трофимов А.Н. Апостериорно-вероятностное декодирование сверточных кодов / А.Н. Трофимов, К.Ш. Зигангиров // Проблемы передачи информации. – 1999. – Т. 35, № 4. – С. 74 – 83.
50. Приходько С.И. Построение сверточных кодов с использованием кодов РС / С. И. Приходько, Г. Е. Березняков // Тематический научно-технический сборник. – Х.: ХВВКИУРВ, 1986. – № 330. – С. 103 - 107.
51. Приходько С.И. Принцип приведения двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам. Часть I. / С.И. Приходько, А.С. Столяров // Специальная техника средств связи. – МО СССР, 1988. – № 3. – С. 14 - 16.
52. Приходько С.И. Принцип приведения двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам. Часть II / С.И. Приходько, А.С. Столяров // Специальная техника средств связи. – МО СССР, 1988. – №4. – С. 25 - 29.
53. Приходько С.И. Приведение двоичных сверточных кодов к недвоичным суженным циклическим кодам / С.И. Приходько, А.Г. Снисаренко // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Х.: ХИРЭ, 1989. – № 90. – С. 80 – 86.
54. Приходько С.И. Приведение сверточных кодов к кодам РС / С.И. Приходько // Радиотехника. Республиканский межведомственный

научно-технический сборник. – Х.: ХИРЭ, 1989. – № 91. – С. 81 - 84.

55. Приходько С.И. Алгебраическое представление сверточных кодов / С.И. Приходько // Вестник международного славянского университета. – Х.: НАНУ, 1998. – Вып. 3. – С. 72 - 75.

56. Приходько С.И. Алгоритм построения сверточных кодов / С.И. Приходько // Информационные системы: сб. науч. труд. – Х.: НАНУ, 1998. – Вып. 1(9). – С. 75 - 82.

57. Приходько С.И. Построение сверточных кодов / С.И. Приходько // Информационные системы: сб. науч. труд. – Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1998. – Вып.1(19). – С. 144-146.

58. Приходько С.И. Алгебраическое построение несистематических сверточных кодов / С.И. Приходько, С.А. Гусев, И.Е. Кужель // Системи обробки інформації. – Х.: ХВУ, 2004. – Вип. 8(36). – С. 170 - 175.

59. Приходько С.И. Алгебраические сверточные коды / С.И. Приходько // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Х.: ХарГАЗТ, 1999. – №2(17). – С. 62 - 63.

60. Приходько С.И. Алгебраическое кодирование сверточных кодов / С.И. Приходько // Информатика: сб. науч. труд. – К.: Наукова Думка, 1998. – Вып. 5. – С. 72 - 75.

61. Приходько С.И. Алгебраический метод сверточного кодирования / С.И. Приходько, С.А. Гусев, И.Е. Кужель // Комп'ютерні системи та інформаційні технології. – Х.: ХАИ, 2005. – №1. – С. 35 - 43.

62. Алгебраическое декодирование сверточных кодов / С.И. Приходько, С.А. Гусев, А.С. Постольный, А.С. Жученко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: УкрДАЗТ, 2005. – №6. – С. 29 - 37.

63. Комбинированный метод декодирования алгебраических сверточных кодов / С.И. Приходько, С.А. Гусев, А.С. Постольный, А.С. Жученко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Х.: УкрДАЗТ, 2006. – №2 (58). – С. 8 - 15.

64. Приходько С.И. Оценка нижней границы свободного кодового расстояния алгебраически заданных сверточных кодов / С.И. Приходько // Системы обработки інформації. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 5(65). – С. 120 – 124.
65. Приходько С.И. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов / С.И. Приходько // Системы обработки інформації. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 2(69). – С. 93 – 96.
66. Краснобаев В.А. Помехоустойчивое кодирование в АСУ / В.А. Краснобаев, С.И. Приходько, А.Г. Снисаренко. – Х.: ХВВКИУРВ, 1990. – 155 с.
67. Wicker S.B. Reed Solomon codes and their applications / S.B. Wicker, V.K. Bhargava. - New Jersey: IEEE Press, Inc, 1994. – 344 p.
68. Габидулин Э. М. Кодирование в радиоэлектронике / Э. М. Габидулин, В. Б. Афанасьев. - М.: Радио и связь, 1986. - 176 с.
69. Федоренко С.В. Методы быстрого декодирования линейных блочных кодов: [монография] / С.В. Федоренко. - СПб.: ГУАП, 2008. - 199 с.
70. Трифонов П.В. Метод быстрого вычисления преобразования Фурье над конечным полем / П.В. Трифонов, С.В. Федоренко // Проблемы передачи информации. - 2003. - Т. 39, № 3. - С. 3 - 10.
71. Федоренко С.В. Сложность декодирования линейных блочных кодов С.В. Федоренко // Проблемы передачи информации.- 1993.- Т.29, №4.- С. 18-23.
72. Федоренко С.В. Метод вычисления дискретного преобразования Фурье над конечным полем / С.В. Федоренко // Проблемы передачи информации. - 2006. - Т. 42, № 2. - С. 81 - 93.
73. Costa E. On computing the syndrome polynomial in Reed - Solomon decoder / E. Costa, S.V.Fedorenko, P.V. Trifonov // European transactions on telecommunications. - 2004. - Vol. 15, № 4. - P. 337 - 342.
74. Fedorenko S.V. Finding roots of polynomials over finite fields S.V. Fedorenko, P.V. Trifonov // IEEE Transactions on Communications. - 2002. - Vol. 50, № 11. - P. 1709 - 1711.

75. Blahut R. E. Transform techniques for error-control codes / R. E. Blahut // IBM journal of research and development. – 1979. - Vol. 23. - P. 299 - 315.
76. Blahut R. E. A universal Reed–Solomon decoder / R. E. Blahut // IBM journal of research and development. - 1984. - Vol. 28. - P. 150 - 158.
77. Муттер В.М. Основы помехоустойчивой телепередачи информации / В.М. Муттер. – Л.: Энергоатомиздат. – Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.
78. Michelson A. A fast transform in some Galois field and an application to decoding Reed-Solomon codes / A. Michelson // IEEE international symposium on information theory. - Sweden, Ronneby, 1976. - P. 49.
79. Gore W.C. Transmitting binary symbols with Reed-Solomon codes / W.C. Gore // Proceedings of princeton conference on information sciences and systems. - Princeton, NJ, 1973. - P. 495 - 497.
80. Reed I.S. The fast decoding of Reed-Solomon codes using Fermat transforms / I.S. Reed, T.K. Truong, L.R. Welch // IEEE transactions on information theory. - 1978. -Vol. 24, №. 4. – P. 497 – 499.
81. Choomchuay S. Fast transform techniques for RS codes / S. Choomchuay // Ladkrabang engineering journal. – 1995. – V. 12, № 1. – P. 32 – 41.
82. Justesen J. On the complexity of decoding Reed-Solomon codes / J. Justesen // IEEE transactions on information theory.-1976.- Vol.22, №2.- P. 237-238.
83. Мак-Вильямс Ф.Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж. Слоэн; пер. с англ. И.И. Грушко, В.А. Зиновьева; под. ред. Л.А. Бассальго. – М.: Связь, 1979. – 744 с.
84. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд; пер. с англ. под. ред. Ю.Н. Александрова. - М.: Мир, 1978. -848 с.
85. Rader C. M. Discrete Fourier transforms when the number of data

samples is prime / C. M. Rader // Proceedings of the IEEE. - 1968. - Vol. 56, № 6. - P. 1107 - 1108.

86. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток / Г. Нуссбаумер; [пер. с англ. под ред. Чл.-кор. АН КазССР В.М. Амербаева, Т.Э. Кренкеля]. – М.: Радио и связь, 1985. – 248 с.

87. Власенко В.А. Методы синтеза быстрых алгоритмов свертки и спектрального анализа сигналов / В.А. Власенко, Ю.М. Лапа, Л.П. Ярославский. – М.: Наука, 1990. – 180 с.

88. Афанасьев В. В. Алгоритмы БПФ для полей $GF(2^m)$ / В. В. Афанасьев, И. И. Грушко // Помехоустойчивое кодирование и надежность ЭВМ. - М.: Наука, 1987. - С. 33 - 55.

89. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов / Р. Блейхут; [пер. с англ. И.И. Грушко]. - М.: Мир, 1989. - 448 с.

90. ван дер Варден Б.Л. Алгебра / Б.Л. ван дер Варден; [пер. с нем. А.А. Бельского]; под ред Ю.И. Мерзлякова. - М.: Наука, 1976. - 648 с.

91. Захарова Т.Г. Вычисление преобразования Фурье в полях характеристики 2 / Т.Г. Захарова // Проблемы передачи информации. - 1992. - Т. 28, № 2. - С. 62 - 77.

92. Лидл Р., Конечные поля: в 2-х т. / Р. Лидл, Г. Нидеррайтер; пер. с англ. А. Е. Жукова, под ред. В. И. Нечаева. - М.: Мир, 1988. - 822 с.

93. Липницкий В.А. О вычислении дискретного преобразования Фурье в полях Галуа / В.А. Липницкий, Е.Д. Стройникова // Сибирский журнал индустриальной математики. - 2002. - Т. V, № 3(11). - С. 131 - 138.

94. Hong J. Computing m DFT's over $GF(q)$ with one DFT over $GF(q^m)$ / J. Hong, M. Vetterli // IEEE transactions on information theory. - January 1993. - Vol. 39, № 1. - P. 271 - 274.

95. Pollard J. M. The fast Fourier transform in a finite field / J. M. Pollard // Mathematics of computation. - 1971. - Vol. 25. - P. 365 – 374.

96. Ахмед Н. Ортогональные преобразования при обработке

цифровых сигналов / Н. Ахмед, К.Р. Рао; пер. с англ. Т.Э. Кренкеля; под ред. И.Б. Фоменко. - М.: Связь, 1980. - 248 с.

97. Макклеллан Дж.Х. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов / Дж.Х. Макклеллан, Ч.М. Рейдер; пер. с англ. Т.Э. Кренкеля, В.И. Журавлева; под ред. Ю.И. Манина. - М.: Радио и связь, 1983. - 264 с.

98. Afanasyev V. B. On Complexity of FFT over finite field / V. B. Afanasyev // Proc. 6th joint Swedish-Russian int. workshop on information theory. - Sweden, Mölle, 1993. - P. 315 - 319.

99. Winograd S. Arithmetic complexity of computations / S. Winograd. - Philadelphia: SIAM, 1980. - p. 97.

100. Приходько С.И. Фурье-преобразование сверточных кодов / С.И. Приходько, Н.А. Штомпель // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2008. - №4. - С. 66 - 68.

101. Штомпель М.А. Метод алгебраїчного декодування згорткових кодів у частотній області / М.А. Штомпель // Зб. наук. праць. - Харків: УкрДАЗТ, 2008. - Вип. 98. - С. 104 - 111.

102. Приходько С.И. Метод блокового частотного декодирования сверточных кодов / С.И. Приходько, Н.А. Штомпель, А.В. Бушримас // Системи обробки інформації. - 2008. - Вип. 7 (74). - С. 109 - 111.

103. Приходько С.И. Метод сверточного кодирования на основе быстрых алгоритмов / С.И. Приходько, Н.А. Штомпель // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2009. - Вып. 159. - С. 283 - 287.

104. Штомпель М.А. Згорткове кодування з використанням ШПФ Винограда // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. - Харків: УкрДАЗТ, 2010. - Вип. 114. - С. 46 - 49.

105. Приходько С.И., Штомпель Н.А., Босько В.В. Метод частотного декодирования сверточных кодов // П'ята наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології - для захисту повітряного простору", 15-16 квітня 2009 року: тези доповідей. -

Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2009. – С. 113.

106. Приходько С.И., Штомпель. Н.А. Метод алгебраического декодирования сверточных кодов в частотной области // Проблемы информатики та моделювання. Матеріали дев'ятої міжнародної науково-технічної конференції. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2009. – С. 48.

107. Штомпель М.А Кодування згорткових кодів з використанням ШПФ Винограда / М.А. Штомпель // Шоста наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба “Новітні технології – для захисту повітряного простору”, 14-15 квітня 2010 року: тези доповідей. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2010. – С. 222 - 223.

108. Балакирский В.Б. Декодирование сверточных кодов с использованием списков / В.Б. Балакирский, Б.Д. Кудряшов // Проблемы передачи информации. – 1989. – Т. 25, № 1. – С. 16 – 23.

109. Зигангиров К.Ш. К теории низкоплотностных сверточных кодов I / К.Ш. Зигангиров, К. Енгдал // Проблемы передачи информации. – 1999. – Т. 35, № 4. - С. 12–28.

110. Зигангиров К.Ш. К теории низкоплотностных сверточных кодов II / К.Ш. Зигангиров, М. Лентмайер, Д. В. Трухачев // Проблемы передачи информации. – 2001. – Т. 37, № 4. - С. 15–35.

111. Колесник В. Д. Декодирование циклических кодов / В. Д. Колесник, Е. Т. Мирончиков. - М.: Связь, 1968. - 252 с.

112. Галлагер Р.Г. Теория информации и надежности связи / Р.Г. Галлагер; пер. с англ. под ред. М.С. Пинскера, Б.С. Цыбакова. - М.: Сов. радио, 1974. - 720 с.

113. Берлекэмп Э. Алгебраическая теория кодирования / Э. Берлекэмп; [пер. с англ. И.И. Грушко]; под. ред. С.Д. Бермана. – М.: Мир, 1971. – 477 с.

114. Meyer-Baese U. Digital signal processing with field programmable gate arrays / U. Meyer-Baese. – Berlin: Springer, 2001. – p. 422.

115. Солонина А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки

сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – Спб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.

116. Марков С. Цифровые сигнальные процессоры. Книга 1 / С. Марков. – М.: фирма МИКРОАРТ, 1996. – 144 с.

117. Куприянов М.С. Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования / М.С. Куприянов. – [2-е изд., перераб. и доп.] – СПб.: Политехника, 1999. – 592 с.

118. Gatherer A. The application of programmable DSPs in mobile communications / A. Gatherer, E. Auslander. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 400 p.

119. TMS320C64x technical overview [Электронный ресурс]. - Texas Instruments, January 2001. – p. 57. - Режим доступа: <http://focus.ti.com/lit/ug/spru395b/spru395b.pdf>.

120. TMS320C64x/C64x+ DSP CPU and instruction set reference guide [Электронный ресурс]. - Texas Instruments, October 2008. – p. 685. - Режим доступа: <http://web.cefriel.it/~brandole/pc/14-ti-64xx-is.pdf>.

121. Shao H. M. A VLSI design of a pipeline Reed–Solomon decoder / H. M. Shao, T. K. Truong, L. J. Deutsch, J. H. Yuen, I. S. Reed // IEEE transactions on computers. - 1985. - Vol. C-34. - P. 393 – 403.

122. Sarwate D. V. High-speed architectures for Reed-Solomon decoders / D. V. Sarwate, N. R. Shanbhag // IEEE transactions on VLSI systems. - 2001.- Vol. 9, № 5. – P. 641 – 655.

123. H. Lee High-speed VLSI architecture for parallel Reed-Solomon decoder / H. Lee // IEEE transactions on VLSI systems. - 2003. – Vol. 11, № 2. – PP. 288- 294.

124. Sankaran J. Reed Solomon decoder: TMS320C64x Implementation [Электронный ресурс] / J. Sankaran // Digital signal processing solutions application report, Texas Instruments, December 2000. – p. 70 – Режим доступа: <http://focus.ti.com/lit/an/spra686/spra686.pdf>.

125. Paar C. Comparison of arithmetic architectures for Reed-Solomon

decoders in reconfigurable hardware / C. Paar, M. Rosner // 5th IEEE Symposium on FPGA-Based Custom Computing Machines (FCCM '97). – 1997. - P. 219.

126. Quick start your embedded hardware development with Virtex®-5 FPGAs. [Электронный ресурс]. – р. 25. – Режим доступа: http://www.xilinx.com/events/seminars/high-performance/presentations/embedded_processing_hw_ns_v4.pdf

127. Montgomery P. Multiplication without trial division / P. Montgomery // Mathematics of computation. – 1985 - Vol. 44, issue 170. - P. 519-521.

128. Paar C. Fast finite field arithmetic for VLSI design / C. Paar // 3rd Benelux-Japan workshop on coding and information theory, Institute for experimental mathematics, University of Essen, Germany, 30 august 1993. - P. 7.

129. Paar C. A parallel Galois field multiplier with low complexity based on composite fields / C. Paar // 6th Joint Swedish-Russian Workshop on Information Theory, Molle, Sweden, 22-27 August 1993. – P. 320-324.

130. Ahlquist G. C. Optimal Finite Field Multipliers for FPGAs [Электронный ресурс] / G.C. Ahlquist, M.Rice and B.Nelson. – FPL, 1999. – P. 10. – Режим доступа: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.35.5237>.