

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 TMS320C6416T.....	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 недвоичных 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 Берлекэмп-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: УкрГАЖТ, 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 информации. – Х.: ХУПС, 2007. – Вып. 5(65). – С. 120 – 124.
65. Приходько С.И. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов / С.И. Приходько // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 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]. – p. 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>.