**Реализация приемника WCDMA**.

**Краткое описание технологии WCDMA на физическом уровне.**

Большинство каналов физического уровня имеют следующую структуру. Канал разбит на *фреймы* длительностью . Каждый фрейм разбит на 15 *слотов.* Слот разбит на  2560 *чипов* длительностью *.* Чип – элемент псевдослучайной последовательности (ПСП), не подлежащий дальнейшему делению. Количество чипов в 1-м фрейме . Носителем чипа в канале связи является импульс типа *корень из приподнятого косинуса* с коэффициентом среза 0.22 (формула 11). Частота следования чипов составляет МГц.

Из пар требуемых для передачи битов (полученных с уровня L2) в канале формируются элементы сигнального созвездия QPSK (далее дибиты). Обозначим через дибит в позиции в -м фрейме в -м канале. Физические каналы разделяются с помощью ортогональных кодов , задаваемых выражением

Канал с номером имеет *коэффициент расширения спектра* и соответствующее кодовое слово с номером . Каждый дибит перемножается с кодом канала , и для -го фрейма формируется вектор -го канала

Видно, что число передаваемых битов и информационная скорость в -м канале обратно пропорциональны его SF.

Векторы (1) имеют плохие корреляционные свойства и для их улучшения поэлементно перемножаются со *скремблирующей* последовательностью . Элементы как чипы передаются в канале *CPICH* с кодом и дибитами . Данный канал не передает полезную информацию и используется на приемной стороне для демодуляции сигнала. Для разных сот код уникален. Параметром, задающим уникальность является *индекс* *первичного кода синхронизации*  (описание ниже).

Векторы разных каналов скремблируются кодом и затем складываются арифметически (**-**здесь операция поэлементного умножения)

Из (3) видим, что к указанным физическим каналам дополнительно добавляются *первичный и вторичный каналы синхронизации* PSC и SSC без наложения скремблирующий кода. Структура каналов синхронизации PSC и SSC представлена на рисунке 1. Границы данных каналов имеют ту же фреймовую и слотовую структуру, элементарный импульс (чип) аналогичен импульсу других физических каналов. Канал PSC одинаков для всех сот, канал SSC уникален для ближайших сот. По каналу PSC приемник обнаруживает наличие сигнала , канал SSC ускоряет определении кода .

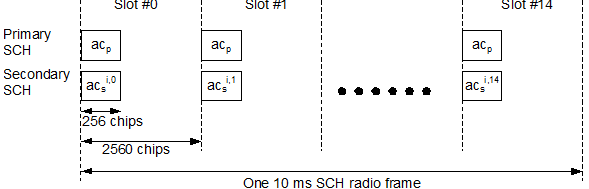


Рисунок 1 –Структура каналов синхронизации.

В *каждом* слоте канала PSC передается паттерн

за которым следуют 2560-256 = 2304 нулевых символа. В канале SSC нулевые символы расположены в тех же местах, а заменяется последовательностью различных паттернов в слотах 0..14

где **-**строка матрицы Адамара размера 256,  **-** операция поэлементного умножения векторов. Индекс определяется на основании *кода группы* и номера слота .Таблица индексов приведена в TS 25.213. Вектор задается выражением

.

Вектор формируется на основе поэлементного xor-а 2-х M-последовательностей, сдвинутых на индекс первичного кода синхронизации :

М-последовательности генерируются на основе уравнений

(8)

с начальными условиями и . Из получим

(9)

Для полученной последовательным объединением ПСП формируется огибающая на выходе модулятора

(11)

**Алгоритм декодирования сигнала.**

Приемник *оптимально* в смысле критерия *идеального* *наблюдателя* оценивает принятые биты информации на фоне искажений сигнала в канале (частотное смещение, неопределенности по фазе, многолучевость, рассогласование тактовых частот передатчика и приемника, аддитивный шум). Сигнал на входе приемника можно представить в виде

здесь -число лучей на входе приемника, и - вес и задержка -го луча,-частотное смещение сигнала относительно опорной частоты приемника, -аддитивный белый гауссовский шум.

Имеется несколько этапов работы приемника. На этапе *поиска* принимается решение о наличии сигнала, грубо оценивается частотное смещение сигнала и определяется скремблирующий код **.** На этапе *захвата* на основе кода канала CPICH ищется начало фрейма, с которого начинается демодуляция. На этапе *демодуляции* приемникформирует оптимальные оценки принятых канальных символов, непрерывно компенсируя частотное и временное смещения принимаемого сигнала. В случае срыва состояния синхронизации приемник снова переходит на этап поиска. Критерием потери состояния синхронизации является наличие в декодированных битах канала CPICH единиц в количестве выше определенного порога, т. к. априори известно, что в этом канале передаются нули. Сигнал на приемной стороне непрерывно оцифровывается с частотой дискретизации , задаваемой SDR-приемником. На приемник посылается последовательность выборок .

Опишем алгоритм получения оценки и кода . Из принятого сигнала выделяется отрезок с числом сэмплов . Пусть обозначают соответственно дискретизированные с частотой огибающие каналов PSC, SSC с кодом группы , CPICH с кодом группы и индексом из формулы (7). Выполним корреляцию с каналом PSC с различными частотными сдвигами в пределах и возьмем значение по модулю

где -смещение в пределах одного слота, задает смещение по частоте, - шаг при задании смещения по частоте. Для достоверной оценки смещения по частоте должно выполняться условие . Величины и , максимизирующие значение , определяют искомую оценку частоты и наиболее вероятное *начало слота*. Для определения кода требуется найти параметры и из формулы (7). Выполним корреляцию с каналом SSC с учетом того, что после оценки начала слота существует только 15 возможных позиций (включая ) начала фрейма.

Параметры и , максимизирующие значение , определяют наиболее вероятный код группы и *начало фрейма*. Зная начало фрейма и код группы вычислим корреляции с каналом CPICH

Индекс определяет наиболее вероятный первичный индекс скремблирующего кода (формула (7)) и, соответственно, сам код . В данном алгоритме не вычисляется порог, при превышении которого принимается решение о наличии сигнала, что упрощает реализацию приемника. В случае слабого сигнала или его отсутствия приемник с этапа демодуляции будет быстро возвращаться на этап поиска. На этом описание алгоритма закончено. Ввиду многократного вычисления (13), (14), (15) данный этап не может быть осуществлен в режиме реального времени, но для существенного ускорения выполнения корреляция производится на основе алгоритма быстрой свертки со сложностью . Для согласования работы демодулятора и SDR-приемника в программной реализации имеется кольцевой буфер, работающий в отдельном потоке, что позволяет SDR оцифровывать сигнал в непрерывном режиме, а приемнику по необходимости переключаться между режимами реального времени (этапы демодуляции и захвата сигнала) и длительной постобработки куска принятого сигнала (этап поиска).

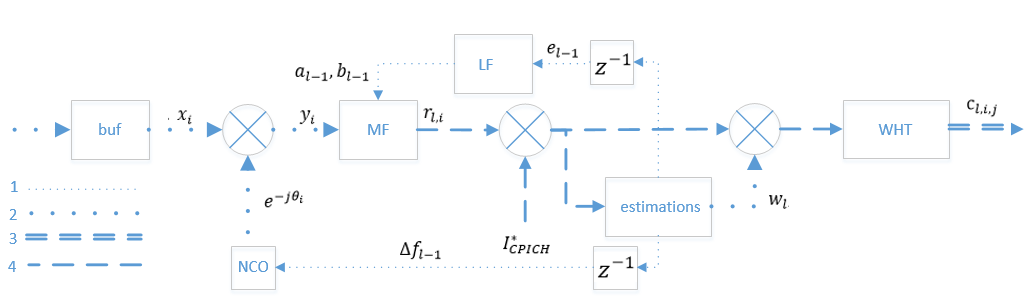


Рисунок 2 – Структурная схема приемника.

Опишем этап демодуляции*.* Алгоритм работы представим набором функциональных блоков , взаимодействующих друг с другом через *потоки*. Потоком называется последовательность элементов с выхода одного блока на вход другого блока. Используемые типы потоков (рисунок 2) : 1 - вещественных чисел, 2 - комплексных чисел, 3 – комплексных двумерных массивов, 4 - комплексных векторов. Индексы элементов идут в порядке , где -номер элемента, -индексы позиции внутри элемента. Используемые в дальнейшем описании величины представлены на рисунке 2.

Блок MF представляет собой *полифазный,* *согласованный* с импульсом фильтр, где происходит получение чипов ПСП с коэффициентом передискретизации . Блок позволяет с помощью управляющего сигнала корректировать для поддержания состояния синхронизации. Оценка (формула 17) временного смещения подается на петлевой фильтр *LF* с разностным уравнением где - коэффициенты ФАПЧ 2-го порядка с демпинг-фактором и шириной полосы :

(16).

(17)

В (17) для получения сравнивается принимаемый скремблирующий код в канале CPICH с задержанным и опережающим на один чип скремблирующими кодами в демодуляторе, не используя промежуточных отсчетов огибающей, что отличает данную схему от стандартных с использованием корреляторов с задержанными / опережающими на 0.125 … 0.5 чипа опорными сигналами и позволяет блоку MF выдавать только оценки чипов. В этом случае вычислительная нагрузка значительно снижается, поскольку блок MF является наиболее вычислительно затратным на этапе демодуляции. Данный прием возможен, если на входе приемника присутствует один сильный луч, в противном случае в сложной помеховой обстановке возможна нестабильная работа. Моделирование в отсутствии шума показано на рисунке 3, указан коэффициент наклона на линейном участке.

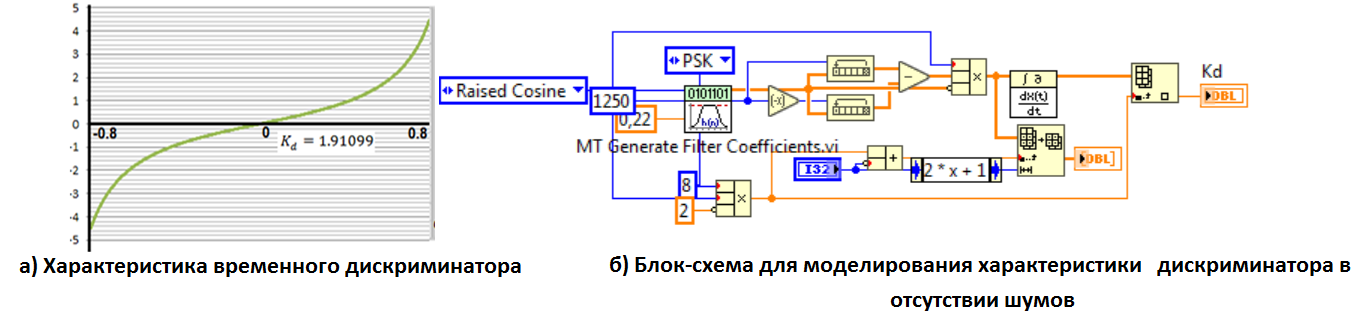


Рисунок 3–Характеристика временного дискриминатора.

Полифазный фильтр подразумевает наличие *банка* *фильтров* - набора импульсных характеристик (ИХ) вида , оцифрованных с частотой на интервале и отличающихся временным смещением в пределах интервала дискретизации на величину для -й ИХ относительно ИХ с индексом 0. Значение отсчета с номером для -й ИХ составит

*Состоянию* блока MF однозначно сопоставляется номер используемого фильтра из банка и номер последнего отсчета сигнала , используемого в свертке. Эволюция состояния с получением каждого задается выражением , полагая в случае , и иначе. Состояние определяется на этапе захвата.

Блок *estimations* для фрейма с номером формирует оценки частотного смещения , смещения по времени и фазы луча. Обеспечение каузальности требует при демодуляции использовать оценки, полученные из ранее принятого фрейма. Сигнал из кольцевого буфера *buf* выравнивается по частоте

Сильно зашумленные оценки (3) задаются выражением (оценка на основе канала CPICH)

Для точной оценки частотного смещения сравниваем оценку фазы в текущем и предыдущем фреймах, получаем грубую оценку частотного смещения и выполняем *экспоненциальное* *усреднение*

Первоначальная оценка получена на этапе поиска, далее происходит переходный процесс (ПП) схождения к более точному значению. Первоначальное временное смещение полагается равным нулю и далее также претерпевает ПП. Указанные ПП приводят к временному ухудшению качества оценки полученных канальных символов, поэтому частые срывы синхронизации нежелательны. ПП в схеме подстройки по времени влияет сильнее на качество работы приемника.

Оценки канальных символов *всех* возможных каналов в -м фрейме получаются на основе (1) со сложностью (блок *WHT*) . Величины получены из (20).

Качество конкретного канале определяется по ОСШ на бит , где и – амплитуда и дисперсия оценки бита. Оценка на основе последовательности мягких решений в данном канале задается выражением (битовые ошибки искажают оценку )

(22)

При низких алгоритм работает некорректно.

На этапе захвата сигнала последовательно переведем блок MF в состояния , -начальное состояние перед началом работы. Для каждого имеем свертку . Оценим на основе положения корреляционного пика

**Описание реализованных в LabVIEW блоков.**

Список блоков указан в таблице 1, реализация на рисунке 4. Конечный автомат приемника не реализован. Оценки и передаются в блок *Demodulator*. Блоки рассчитаны на обработку сигнала, оцифрованного с частотой дискретизации . Для модели не требуется обеспечение высокой производительности, а код имеет всего 512 вариантов, поэтому для упрощения этап оценки кода группы пропущен. Выходом блока *Demodulator* являются оценки канальных символов.

Таблица 1 – Реализованные в LabVIEW блоки.

|  |  |
| --- | --- |
| Название | Назначение |
| *Searcher* | Оценивает и в канале по сегменту размером 76800 сэмплов. |
| *PSC* | Формирует вектор . |
| *Shape* | Формирующий фильтр Найквиста. |
| *Gold* | Формирует вектор по индексу . |
| *Df corr* | Смещает сигнал по частоте на заданное значение. |
| *Demodulator* | Реализует алгоритм обработки сигнала на этапе демодуляции. |
| *Peak detector* | Ищет корр. пик алгоритмом со сложностью . |

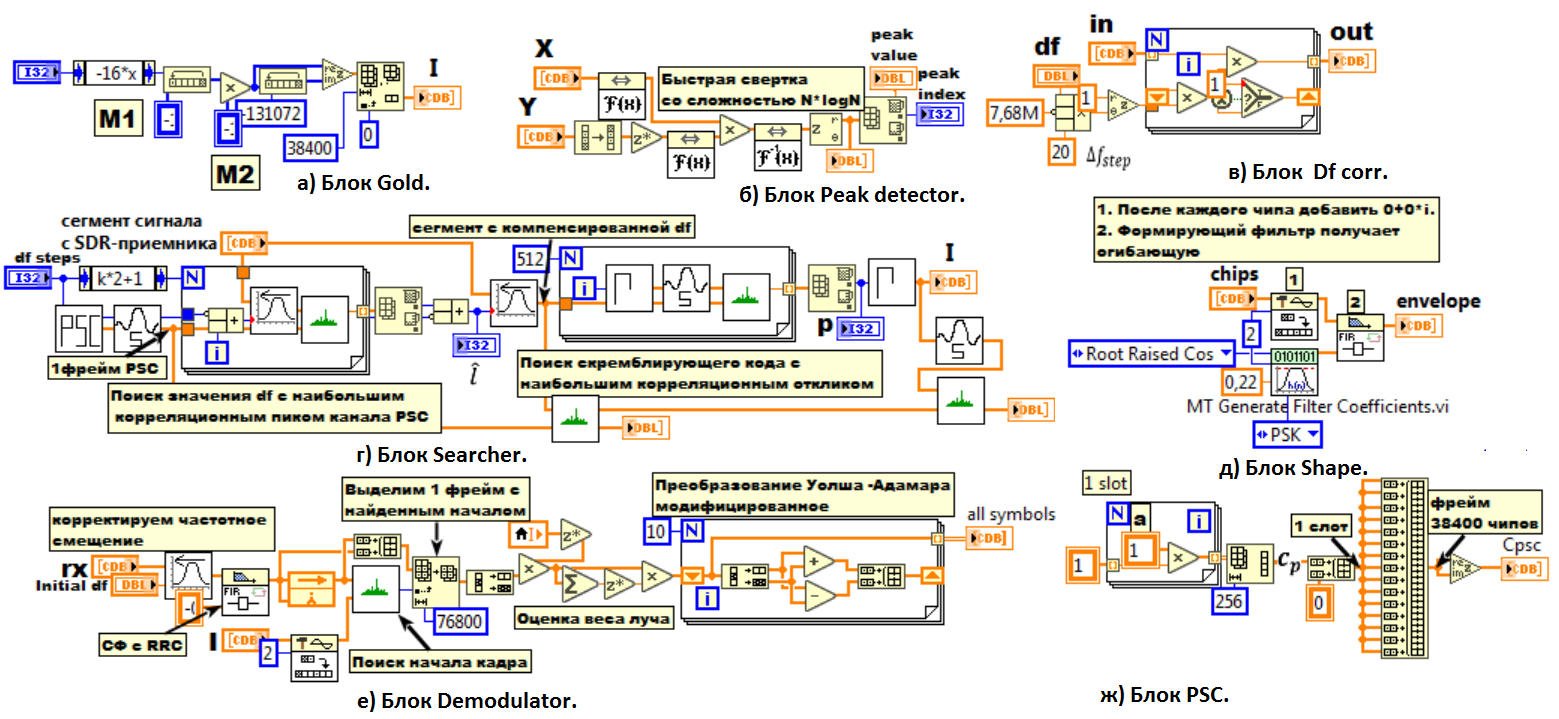


Рисунок 4–Реализация блоков в LabVIEW.

Для тестирования данные файла с *реальным* записанным сигналом разбиваются на сегменты по 76800 отсчетов (длительность одного фрейма) и подаются на блоки *Searcher* (используется только 1 сегмент) и *Demodulator*. Критерием корректности работы блока *Searcher* является наличие выраженных корреляционных пиков, полученных от каналов PSC и CPICH (рисунок 5, диаграммы *PSC, CPICH convolution*). Пики канала PSC идут через интервалы и имеют меньшее значение, чем пик канала CPICH. Критерием корректности работы блока *Demodulator* является наличие выраженных канальных символов в задействованных физических каналах на фоне шумов в незадействованных каналах. Таблица всех канальных символов, взятых по модулю, показана на рисунке 5, диаграмма *dibits* *energy*. Картина выраженных канальных символов должна наблюдаться на большом числе последовательно обработанных фреймов. Из диаграммы *CCPCH channel dibits* видим, что в канале CCPCH сложилось сигнальное созвездие на интервале 1 фрейм, что также говорит о корректности работы модели. Для данного канала характерно отсутствие передачи в первом канальном символе в каждом слоте, поэтому в центре сигнального созвездия имеется 15 незначащих дибитов, представляющих шум. Можно сделать вывод о корректности реализации модели.

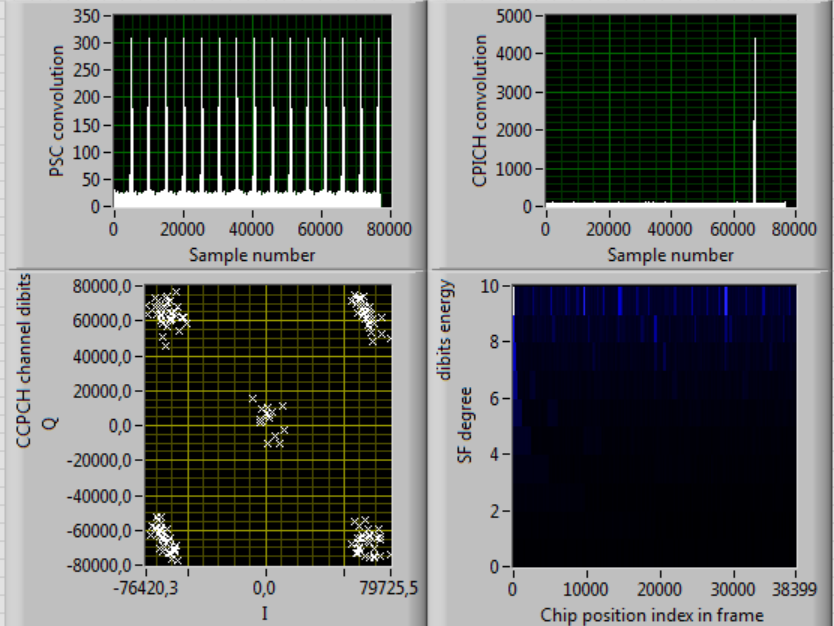


Рисунок 5-Результаты обработки реального сигнала в модели приемника в LabVIEW.

**Реализация приемника на C++**

На основе модели, разработанной в LabVIEW, был разработан приемник в C++. Код представлен в. На рисунке 6 представлены диаграммы работы приемника. Диаграмма *Оценка частотного смещения* отображает работу схемы частотной коррекции, показывая текущую разницу между частотой принятого сигнала и опорной частотой в SDR – приемнике, виден ПП схождения к более точному значению. Диаграмма *Оценка ОСШ в канале CPICH в каждом фрейме* отображает на основе формулы (22). Диаграмма *Выход временного дискриминатора* отображает на основе (17), здесь в начале работы также видим ПП.

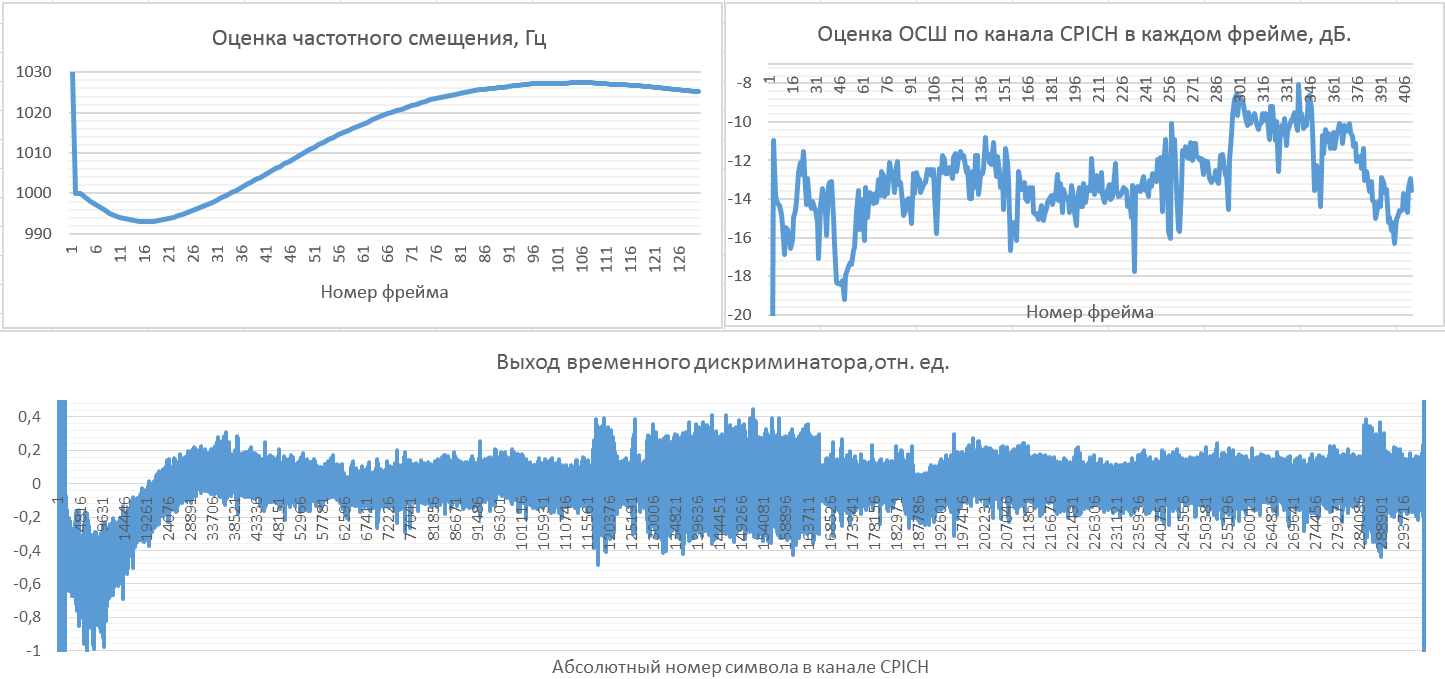


Рисунок 6 - Некоторые контрольные точки работы приемника.

**Библиографический список**

1.CDMA: прошлое, настоящее, будущее[Текст] : монография / Л. Е. Варакин [и др.]; под ред. Л. Е. Варакина, Ю. С. Шинакова. –М.:Междунар. акад. cвязи, 2003,-601 c.

2.Петрович, Н. Т. Системы связи с шумоподобными сигналами [Текст]/ Н. Т. Петрович, М. К. Размахнин.-М.: Советское радио, 1969.-232 с.

3.Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение [Текст]/ Р. Морелос-Сарагоса-М.: Техносфера, 2005.- 320 с.

4.Вернер , М. Основы кодирования [Текст]/ М. Вернер- М.: Техносфера, 2004.-288 с.

5.Ipatov, V. P. Spread spectrum and CDMA. Principles and Applications [Text]/ V. P. Ipatov –WILEY,2004.-373 c.

6.Yang, Samuel C. CDMA RF System Engineering [Text]/ Samuel C. Yang-Norwood: Artech House, 1998.-289 с.

7. Кехтарнаваз, Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabVIEW [Текст]/ Н. Кехтарнаваз, Н. Ким.-М.: Издательский дом “ДОДЭКА-XXI”, 2007.-304 c.

8. Прокис, Дж. Цифровая связь. Пер. с англ.[Текст]/ Дж. Прокис-М.: Радио и связь, 2000.-800 с.

10.Tretter , St. A. Communication System Design Using DSP Algorithms with Laboratory Experiments for the TMS320C6713 DSK[Текст]/St. A. Tretter-New York:Springer,2008.-344 p.

11. Суранов, А. Я. LabVIEW 8.20. Справочник по функциям.[Текст]/ Суранов А. Я.-М.:ДМК Пресс, 2007.-536 c.

12.Yang, Y. LabVIEW graphical programming cookbook.[Text]/Y. Yang-Birmingham:Packt, 2014.-235 р.

15.Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами.[Текст]/Л. Е. Варакин-М.: Радио и связь, 1985. — 384 с., ил.

16. 214. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое при-

менение. Изд. 2-е: Пер. с англ. – М.: Из-дательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

17. Ettus Research [Electronic resource]. - <http://www.ettus.com>

18.National Instruments [Electronic resource].-http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-355

19.Шумоподобные сигналы в системах передачи информации .[Текст]/ Пестряков В.Б., Афанасьев В.П., Гурвиц В.И.[ и др.]-М.:Советское радио,1973.-424 с.

20.Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы.[Текст]/ С. И. Баскаков-М.:Высшая школа,2000.-462 c.

21.Керниган Брайан У. Язык программирования С.[Текст]/ Брайан У. Керниган, Деннис М. Ритчи.-2-е издание.:пер. с англ.-М.: дом “Вильямс”, 2009.-304 с. : ил.-Парал. тит. англ.