

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра сетей и устройств телекоммуникаций

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ, СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ И
ОБРАБОТКИ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ
ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к лабораторной работе

по дисциплине “Сети подвижной связи с кодовым разделением каналов”
для студентов специальности 1-45 01 03 – Сети телекоммуникаций
всех форм обучения

Минск 2006

УДК 621.396.2(075.8)
ББК 32.884.1я73
И 88

Составители:
И.И. Астровский, П.М. Буй

И 88 **Исследование** свойств, способов формирования и обработки М-последовательностей в системах подвижной связи. Метод. указания к лаб. работе по дисциплине “Сети подвижной связи с кодовым разделением каналов” для студентов специальности 1-45 01 03 – Сети телекоммуникаций всех форм обуч. / Сост. И.И. Астровский, П.М. Буй. – Мн. : БГУИР, 2006. 12 с.: ил.

Исследуются свойства, способы формирования и обработки М-последовательностей в системах подвижной связи. Рассматриваются вопросы применения М-последовательностей в CDMA-системах.

Лабораторная работа выполняется на ПЭВМ в диалоговом режиме. Программа составлена в соответствии с современными требованиями к программному продукту и обеспечивает необходимый сервис и защиту от неправильных действий пользователя. В процессе выполнения лабораторной работы пользователь может получать помощь и пояснения.

Лабораторная работа может быть использована при изучении других курсов, связанных с цифровой обработкой сигналов в системах подвижной связи.

УДК 621.396.2(075.8)
ББК 32.884.1я73

© Астровский И.И., Буй П.М.,
составление, 2006
© БГУИР, 2006

1. Цель работы

Исследование свойств, способов формирования, обработки и применений M-последовательностей в радиотехнических системах.

2. Теоретические сведения

Сигналы, база которых существенно больше единицы ($B=T \cdot F \gg 1$, где T — длительность элемента сигнала, F — полоса частот), обычно называются сложными. По отношению к исходному (информационному) сложный сигнал представляет собой шум с практически одинаковой спектральной плотностью мощности. Известно, что чем сильнее «растянут» спектр сигнала в эфире, тем меньше его спектральная плотность. Благодаря этому свойству сигналы с большой базой могут применяться в «чужой» (уже занятой) полосе частот «на вторичной основе», оказывая на работающую там систему сколь угодно малое воздействие.

Кодовые последовательности, используемые в CDMA-системах для передачи сигнала, состоят из N элементарных символов (чипов). Каждый информационный символ сигнала складывается с одной N -символьной последовательностью, которая называется «расширяющей» (spreading sequence), поскольку «результатирующий» сигнал излучается в эфир с преднамеренно расширенным спектром. Выигрыш в качестве связи зависит как от числа символов (длины) последовательности, так и от характеристик совокупности сигналов, в первую очередь — их взаимокорреляционных свойств и способа модуляции.

Вся совокупность кодовых последовательностей, используемых в CDMA, делится на два основных класса: ортогональные (квазиортогональные) и псевдослучайные последовательности (ПСП) с малым уровнем взаимной корреляции (рис. 1).

В оптимальном CDMA-приемнике поступающие на его вход сигналы, которые, по сути, представляют собой аддитивный белый гауссовский шум, всегда обрабатываются с помощью корреляционных методов. Поэтому процедура поиска сводится к нахождению сигнала, максимально коррелированного с индивидуальным кодом абонента. Корреляция между двумя последовательностями $\{x(t)\}$ и $\{y(t)\}$ осуществляется путем сравнения одной последовательности со сдвинутой во времени копией другой. В зависимости от вида последовательности в CDMA-системах применяются различные способы корреляции:

- *автокорреляция*, если перемножаемые псевдослучайные последовательности имеют одинаковый вид, но сдвинуты во времени;
- *взаимная*, если ПСП имеют разные виды;
- *периодическая*, если сдвиг между двумя ПСП является циклическим;
- *апериодическая*, если сдвиг не является циклическим;
- *на части периода*, если результат перемножения включает в себя только сегменты двух последовательностей определенной длины.



Рис. 1. Совокупность кодовых последовательностей, используемых в CDMA

Чтобы получить выигрыш в качестве связи при использовании любого из способов корреляционной обработки, необходимо, чтобы ансамбль сигналов обладал «хорошими» корреляционными свойствами. Желательно, чтобы сигналы имели единственный корреляционный пик, иначе возможна ложная синхронизация по боковому лепестку автокорреляционной функции (АКФ). Заметим, что чем шире спектр излучаемых сигналов, тем уже центральный пик (основной лепесток) АКФ.

Пары кодовых последовательностей подбираются так, чтобы взаимная корреляционная функция (ВКФ) имела минимальное значение при их попарной корреляции. Это гарантирует минимальный уровень взаимных помех.

Таким образом, появление систем связи и навигации с множественным доступом и кодовым разделением каналов потребовало создания алгоритмов формирования и обработки больших ансамблей кодовых последовательностей с хорошими корреляционными характеристиками. Эти ансамбли должны иметь мощность, достаточную для одновременной работы приемопередающих станций в различных режимах. Выбор оптимального ансамбля сигналов в CDMA сводится к поиску такой структуры кодовых последовательностей, в которой центральный пик АКФ имеет наибольший уровень, а боковые лепестки АКФ и максимальные выбросы ВКФ по возможности минимальны.

Ключевую роль в CDMA-системах играют псевдослучайные последовательности, которые, хотя и генерируются детерминированным образом, обладают всеми свойствами случайных сигналов. Они выгодно отличаются от ортогональных последовательностей инвариантностью к временному сдвигу. Существует несколько видов ПСП, обладающих разными характеристиками. Сове-

менные технические средства способны генерировать любой ансамбль последовательностей с заданными свойствами.

Одно из наиболее простых и чрезвычайно эффективных средств генерации двоичных детерминированных последовательностей — использование регистра сдвига. Последовательность на выходе n -разрядного регистра сдвига с обратной связью всегда периодична, причем ее период (число тактов, через которое схема возвращается в исходное состояние) не превышает 2^n . Теоретически, используя n -разрядный регистр и соответствующим образом подобранную логику обратной связи, можно получить последовательность любой длины в пределах от 1 до 2^n включительно. Последовательность максимальной длины, или M -последовательность, имеет период $2^n - 1$. Формируются M -последовательности при помощи линейных автоматов, реализующих проверочные и генераторные полиномы кодов максимальной длины. При построении генераторов M -последовательности можно использовать и операцию деления на проверочный полином.

Выбор псевдослучайной кодовой последовательности в радиотехнической системе передачи информации очень важен, поскольку от ее параметров зависят основные характеристики системы, ее помехоустойчивость, чувствительность. При одной и той же длине кодовой последовательности параметры системы могут быть различны.

Одним из наиболее широко применяемых способов формирования псевдослучайных последовательностей является способ, основанный на использовании соотношения (1):

$$a_k = \sum_{i=1}^n \oplus a_i \cdot a_{k-i}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где k — номер такта; $a_k \in \{0, 1\}$ — символы последовательности; $a_i \in \{0, 1\}$ — постоянные коэффициенты;

$\sum_{i=1}^n \oplus$ — операция суммирования по модулю два n логических переменных.

При соответствующем выборе коэффициентов a_i , на основании характеристического полинома $j(x) = 1a_1x^{1a} 2x^{2a} 3x^{3a} \dots (n-1)x^{(n-1)a} nx^n$, который должен быть примитивным, последовательность бит $\{a_k\}$ имеет максимальную длину, равную $2^n - 1$. Такая последовательность называется M -последовательностью. Главное преимущество метода формирования псевдослучайных последовательностей по соотношению (1) — простота его реализации как программной, так и аппаратной.

Для построения M -последовательностей обычно используют регистры сдвига или элементы задержки заданной длины. Длина M -последовательности равна $2^n - 1$, где n — число разрядов регистра сдвига. Различные варианты подключения выходов разрядов к цепи обратной связи дают некоторый набор последовательностей.

На рис. 2 приведена аппаратная реализация генератора M -последовательности и соответствующего коррелятора или фильтра совпа-

дающих данных, используемого в приемнике. Генератор содержит цепочку последовательно включенных D-триггеров, выходы Q которых соединены со входами D последующих триггеров, за исключением входа D_0 первого триггера. Некоторые из выходов Q триггеров не соединены с генератором бита четности (генератор бита четности представляет собой многовходовый сумматор по mod 2), что отмечено на рисунке пунктирными линиями. Общее число триггеров n и число триггеров, соединенных с генератором бита четности, определяют соответственно длину и свойства формируемой ПСП. На выходе генератора бита четности формируется логический ноль при наличии четного числа логических единиц на входах и логическая единица при наличии нечетного числа логических единиц на входах.

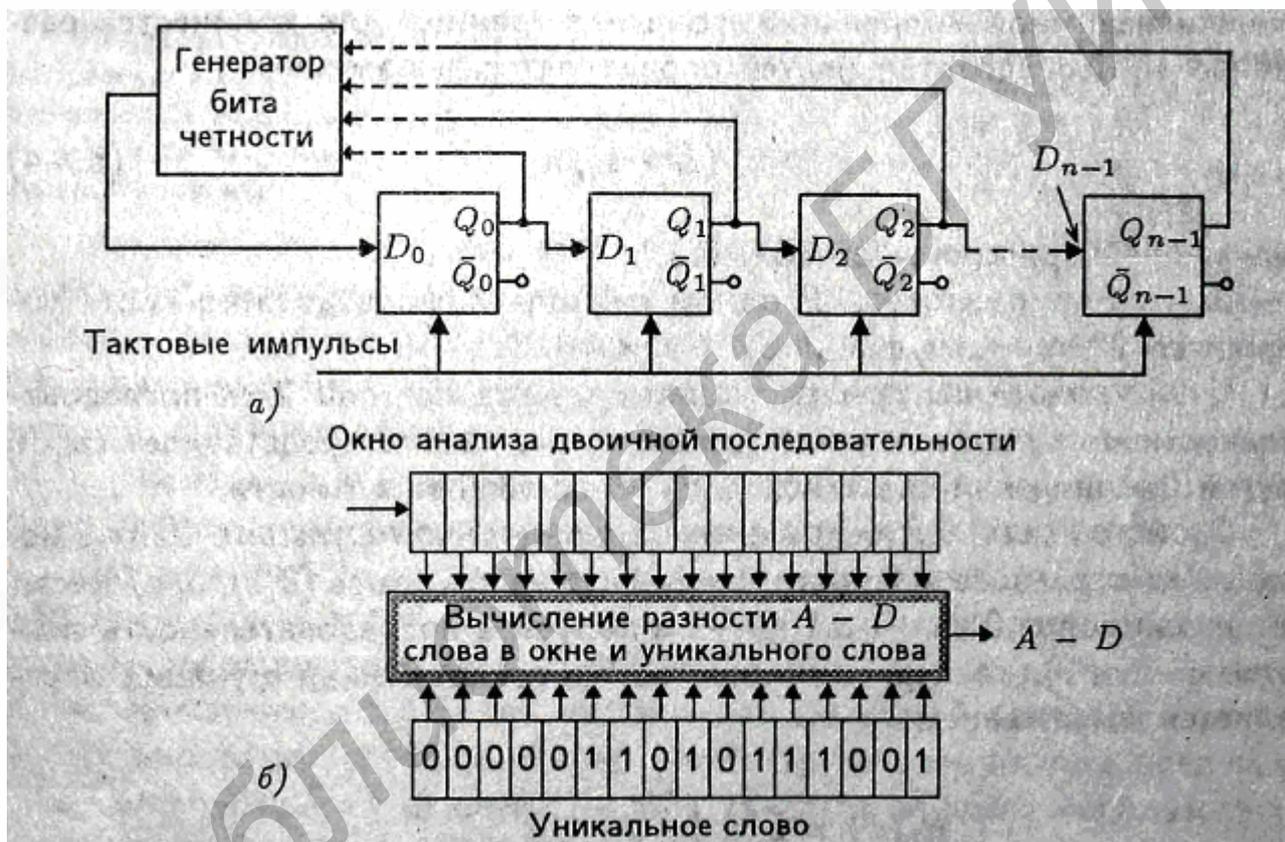


Рис. 2. Схемы генератора ПСП (а) и соответствующего коррелятора – фильтра совпадающих данных (б)

Длина последовательности. Всегда можно найти такой порядок подключения выходов триггеров к генератору бита четности, при котором формируется последовательность максимальной длины с периодом $N = 2^n - 1$ символов, где n – число триггеров.

В таблице приведена зависимость длины последовательностей N и числа M -последовательностей S от числа разрядов n регистра сдвига с обратными связями. Очевидно, что генераторы M -последовательностей чрезвычайно просты и экономичны.

Длина N и число S ПСП максимальной длины при заданном числе разрядов (триггеров) регистра сдвига n

Число разрядов (триггеров) n	Длина последовательности, $N=2^n - 1$	Число М-последовательностей S
3	7	2
4	15	2
5	31	6
6	63	6
7	127	18
8	255	16
9	511	48
10	1023	60
11	2047	176
12	4095	144
13	8191	630
14	16383	756
15	32767	1800

Количество различных последовательностей. В литературных источниках приводятся варианты соединений выходов триггеров регистра сдвига с генератором бита четности, которые позволяют получить различные М-последовательности с малым уровнем взаимной корреляции. Неприводимые многочлены, порождающие М-последовательности, изучены и для них составлены таблицы [5,6].

Верхняя граница для количества различных М-последовательностей определяется выражением

$$S < \frac{(N-1)}{n}.$$

Балансное свойство. В одном периоде М-последовательности содержится $2^{n-1}-1$ нулей и 2^{n-1} единиц, т.е. М-последовательности обладают интересным свойством: в каждой последовательности единиц на одну больше, чем нулей.

Свойство сдвига при сложении. Сумма по mod 2 М-последовательности и ее произвольного циклического сдвига представляет собой другой циклический сдвиг исходной М-последовательности.

Свойство периодической автокорреляционной функции. Если в исходной М-последовательности, состоящей из символов (0,1), произвести замену символов 0 на +1 и 1 на -1 и получить последовательность символов (-1,+1), то периодическая автокорреляционная функция определяется выражением

$$R_a(\tau) = \begin{cases} N = 2^n - 1, & \text{при } \tau = 0 \\ -1, & \text{при } \tau \neq 0 \end{cases}$$

и является наилучшей в том смысле, что не существует какой-либо другой двоичной последовательности с минимальным значением автокорреляционной функции при $\tau \neq 0$. Это свойство М-последовательностей имеет важное значение при их использовании в качестве синхропреамбул для обеспечения символической и цикловой синхронизации.

Свойство случайности. Так как М-последовательность является периодической последовательностью, то она не может считаться случайной. Но для нее все же могут быть определены статистические серии единиц и нулей. Действительно, в каждом периоде половина серий имеет длину 1, четверть – длину 2, восьмая часть серий – длину 3 и т.д.

Максимальное число (значение) автокорреляционной функции принято называть максимальным выбросом автокорреляционной функции. Этот выброс используется для кодовой или цикловой синхронизации. Для промежуточных значений временного сдвига, лежащих между 0 и +1 или -1, автокорреляционная функция является линейно убывающей. Поэтому автокорреляционная функция М-последовательности имеет треугольную форму, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Автокорреляционная функция

Два и более независимых сигнала могут быть переданы одновременно в одной и той же полосе и затем успешно выделены, если их кодовые последовательности представляют собой циклические сдвиги М-последовательностей более чем на один символ. В системах измерения дальности может быть обеспечена точность измерения в пределах длительности одного символа, если в качестве маркера использовать максимальный выброс автокорреляционной функции.

Значительное увеличение числа импульсов N в периоде М-последовательности вызывает незначительное увеличение числа разрядов регистра, так как зависимость n от N является логарифмической.

Автокорреляционная функция усеченной М-последовательности, под которой понимается непериодическая последовательность длиной в N_y

символов, имеет величину боковых пиков, близкую к $\frac{1}{\sqrt{N_y}}$. Поэтому с ростом N_y величина боковых пиков уменьшается.

Благодаря перечисленным свойствам, М-последовательности широко применяют в радиотехнических системах.

Для исследования возможностей нового комплекта микросхем PRISM™ фирмой Harris Semiconductor было проведено практическое исследование коротких М-последовательностей и кодов Баркера с целью нахождения оптимальных из них с точки зрения автокорреляционной функции.

В рамках этого исследования была проанализирована М-последовательность длиной 15 и имеющая вид.

111 1000 1001 1010.

Как выяснилось, она обладает худшими автокорреляционными свойствами, чем последовательность Баркера длиной 13 следующего вида:

1 1111 0011 0101.

Практический вид АКФ М-последовательности показан на рис. 4:

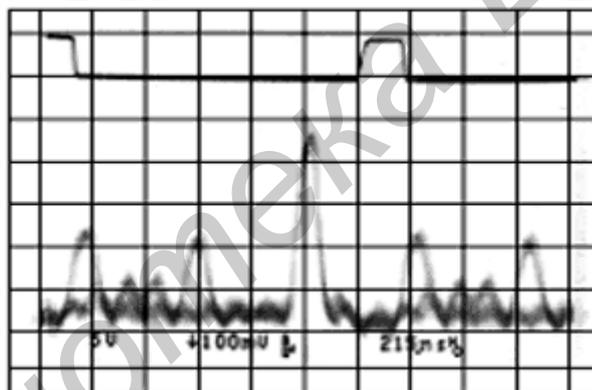


Рис. 4. Автокорреляционная функция М-последовательности

Для сравнения на рис. 5 приведена АКФ кодовой последовательности Баркера длиной 13.

Сверху на фотографии показан синхроимпульс осциллографа. Как видно из фотографий, М-последовательность имеет несколько больших боковых пиков, которые могут значительно ухудшить приемные качества систем с широкополосными сигналами (ШПС), а иногда может привести к ложному обнаружению сигнала.

Как оказалось в процессе дальнейших исследований, если к 13 символьной кодовой последовательности Баркера добавить два нуля, то АКФ полученной последовательности **001 1111 0011 0101** будет значительно лучше, чем описанная АКФ М-последовательности, состоящей также из 15 символов. АКФ вновь полученной последовательности показана на рис. 6.

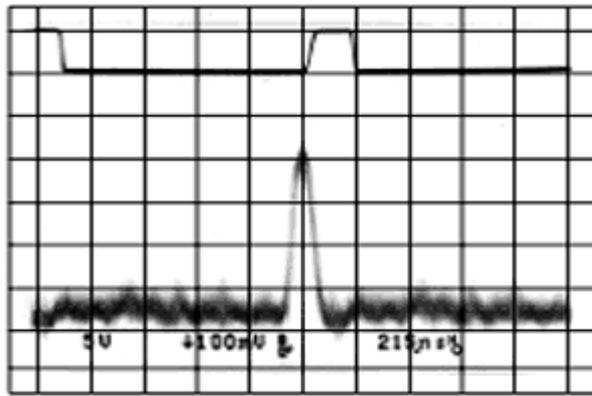


Рис. 5. Автокорреляционная функция последовательности Баркера длиной 13

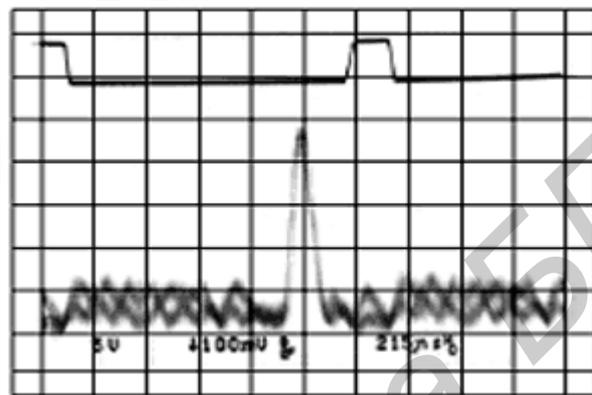


Рис. 6. Автокорреляционная функция последовательности Баркера длиной 13 с добавлением двух нулей

Короткие M-последовательности, таким образом, значительно уступают последовательностям Баркера по автокорреляционным свойствам несмотря на лучший баланс нулей и единиц.

Из наиболее известных систем, использующих M-последовательности, можно назвать подвижную систему связи с кодовым разделением абонентов CDMA и систему глобальной навигации GPS. В системе CDMA используются три кодовых последовательности. Первая из них, используемая для синхронизации работы всего оборудования, обладает переменной длиной $N \approx (32-131)10^3$ символов. Вторая M-последовательность обладает максимальной длиной $N=2^{42}-1$ и используется для идентификации абонентских станций со стороны базовой станции. Третья последовательность используется для передачи полезной информации между базовой и абонентской станциями и представляет собой одну из последовательностей Уолша. Последовательности Уолша (в качестве них выступают строки или столбцы матрицы Адамара) обладают свойством ортогональности по отношению друг к другу. С математической точки зрения ортогональность означает, что при отсутствии временного сдвига между последовательностями Уолша, их скалярное произведение равно нулю. С точки зрения радиотехнической, это позволяет устранить взаимные помехи при передаче информации от базовой станции к нескольким абонентским и тем самым резко повысить пропускную способность системы связи. Данное преимущество ортогональности имеет место только в случае точной синхронизации передачи последовательностей всем абонентам. Точная синхронизация базовых и абo-

нентских станций CDMA осуществляется главным образом с помощью глобальной навигационной системы GPS. Кроме последовательностей Уолша в системах связи используются другие ортогональные последовательности: последовательности Диджилок и Стиффлера.

Помимо «чистых» M-последовательностей в системах связи нашли применение составные кодовые последовательности, представляющие собой комбинации M-последовательностей и обладающие некоторыми специфическими свойствами. Наиболее известными и применяемыми из них являются последовательности Гоулда.

3. Программное обеспечение

Лабораторная работа выполняется на персональных ЭВМ. Это позволяет моделировать входные сигналы требуемой формы, генерировать помехи заданной мощности, получать смесь сигнала с другими сигналами или сигнала с помехой с заданным соотношением сигнал/помеха. При выполнении лабораторного задания имеется возможность визуального наблюдения за сигналами, их спектрами и другими показателями. При необходимости можно вновь задавать, изменять и выводить на индикацию требуемые параметры и получать необходимые статистические характеристики.

Наличие меню и свободного перехода от одного пункта меню к другому, работа на ПЭВМ в диалоговом режиме, возможность временной архивации сигналов и их преобразований, наличие защиты от неправильных действий пользователя, возможность получения советов и теоретических сведений по желанию пользователя предоставляют широкие возможности как для эффективного, творческого выполнения лабораторного задания, так и для дополнительных исследований.

Данные выводятся на экран в виде таблиц и графиков. При желании они могут быть выведены на печать. Для более эффективного использования экрана графики выводятся в нормированном виде и сопровождаются индикацией масштабного множителя.

Программа обладает большими возможностями. На её основе могут быть реализованы самостоятельные виды работ или различные варианты лабораторных работ.

4. Предварительное задание

1. Изучить принципы построения M-последовательностей и кодов Баркера.
2. Задаваясь числом разрядов n и обратными связями построить M-последовательности длиной в 7, 15 и 31 символ.
3. Изучить формулы и порядок вычисления периодических и непериодических автокорреляционных и взаимокорреляционных функций.

5. Лабораторное задание

Перед выполнением лабораторного задания следует получить указания преподавателя о параметрах выбираемых сигналов и других данных, или получить разрешение на самостоятельный выбор из главного меню "лабораторное задание".

Начать выполнение лабораторной работы следует с раздела главного меню "предварительное задание". ПЭВМ поможет выяснить, сколь успешно Вы справились с предварительным заданием, работая без ПЭВМ.

При выполнении всех пунктов лабораторного задания следует производить зарисовки и записи данных, имеющих принципиальное значение. Данные таблиц отсчетных значений следует приводить частично, с округлением, но так, чтобы они показывали сущность исследуемых процессов.

При зарисовке графиков следует записывать масштабные множители, обозначения осей, располагать графики и рисунки так, чтобы можно было в дальнейшем производить сравнения.

При выполнении работы следует сохранять в памяти ПЭВМ (архиве) наиболее характерные массивы. Помните, однако, что "архив" временный и исчезнет при выходе из программы.

До выполнения пунктов лабораторного задания следует ознакомиться с заданием целиком. Наибольшим приоритетом обладает задание преподавателя, затем тестирование на ПЭВМ.

Не задерживайтесь на выполнении пунктов, суть которых уже выяснена или, наоборот, не ясна. Сэкономив время, Вы получите возможность возвратиться и с учетом накопленного опыта успешно справиться с затруднениями.

6. Содержание отчета

1. Решение задач предварительного задания.
2. Результаты выполнения лабораторного задания.
3. Результаты машинного тестирования.
4. Анализ результатов и выводы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташевский В.Г., Семенов С.Н., Фирстова Т.В. Сети подвижной связи. - М.:Эко-Трендз, 2001. – 300с.
2. Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. - М.:Эко-Трендз, 1997. – 238с.
3. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Д.Б. Зиминой. - М.: Радио и связь, 1998. – 248с.
4. Андрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи - СПб.: ВНУ-Санкт-Петербург, 1998. – 256с.
5. Питерсон У.У. Коды, исправляющие ошибки. - М.: Мир, 1964.
6. Удалов А.П., Супрун Б.А. Избыточное кодирование при передаче информации двоичными кодами. - М.: Связь, 1964.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ, СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ
И ОБРАБОТКИ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ
ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе

по дисциплине “Сети подвижной связи с кодовым разделением каналов”

для студентов специальности 1-45 01 03 – Сети телекоммуникаций

всех форм обучения

Составители:

Астровский Иван Иванович,

Буй Павел Михайлович

Редактор Т.Н. Крюкова

Подписано в печать
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 0,8.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 2.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6