

УДК 621.375.026

Использование метода внесения цифровых предсказаний для повышения энергоэффективности инфокоммуникационных радиосредств

Смирнов А.А.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
[e-mail: mirnov.alexey.84@gmail.com](mailto:mirnov.alexey.84@gmail.com)

Статья поступила 07.03.2019

Аннотация

В течение последних лет наблюдается взрывной рост портативных инфокоммуникационных устройств. Катализатором такого развития стало несколько факторов, в том числе развитие интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT), широкое развитие БПЛА (беспилотных летательных аппаратов), четвертая промышленная революция (индустрия 4.0) и т.д. Такие условия диктует комплекс требований к электронной аппаратуре инфокоммуникационных средств ответственных за передачу данных, и одной из основных задач является энергоэффективность разрабатываемой радиоаппаратуры. Целью данной работы является анализ эффективности метода внесения цифровых предсказаний и метода отслеживания огибающей, как способы повышения энергоэффективности

инфокоммуникационных средств, а также будет проведено сопоставление фактических результатов внедрения данных методов.

Ключевые слова: инфокоммуникационные средства, усилитель мощности, радиомодуль, линеаризация, метод цифровых предискажений, ПЛИС, интернет вещей, IoT, DPD (digital predistortion) ET (envelope tracking).

За последние несколько лет мобильные устройства совершили значительный прорыв в инфокоммуникационных средствах связи. На сегодняшний день мобильный телефон не просто средство связи. Он представляет собой огромный набор всевозможных приложений, начиная от мессенджеров, электронной почты, работы в облачных сервисах, мультимедиа, а заканчивая возможностью записывать и передавать параметры человеческого тела («фитнес параметры»). Соответственно, с конструктивной точки зрения, большой, яркий экран, большие вычислительные мощности и особенно большой объём передаваемых данных, ставят высокие требования к энергоёмкости внутренних источников питания и высокой эффективности радиоэлектронной части инфокоммуникационного устройства. Сегодня наиболее остро стоит вопрос оптимизации энергопотребления приемопередающими модулями (ППМ).

Наиболее энергозатратной частью в современных носимых абонентских устройствах связи является радиомодуль, который потребляет до 50% от суммарного заряда батареи. В свою очередь в радиомодулях основными

потребителями энергии являются усилители мощности, которые потребляют также до 50% от общего потребления радиомодуля [1,2]. В силу своей нелинейности, усилитель требует точного подбора уровня входного сигнала для обеспечения работы усилителя в линейном режиме. Однако, это требование противоречит необходимости наиболее эффективного использования усилителя, то есть получения максимально возможного сигнала на его выходе. Поиск оптимальной рабочей точки является компромиссным решением. На рис. 1 показана амплитудная характеристика (АХ) усилителя мощности.

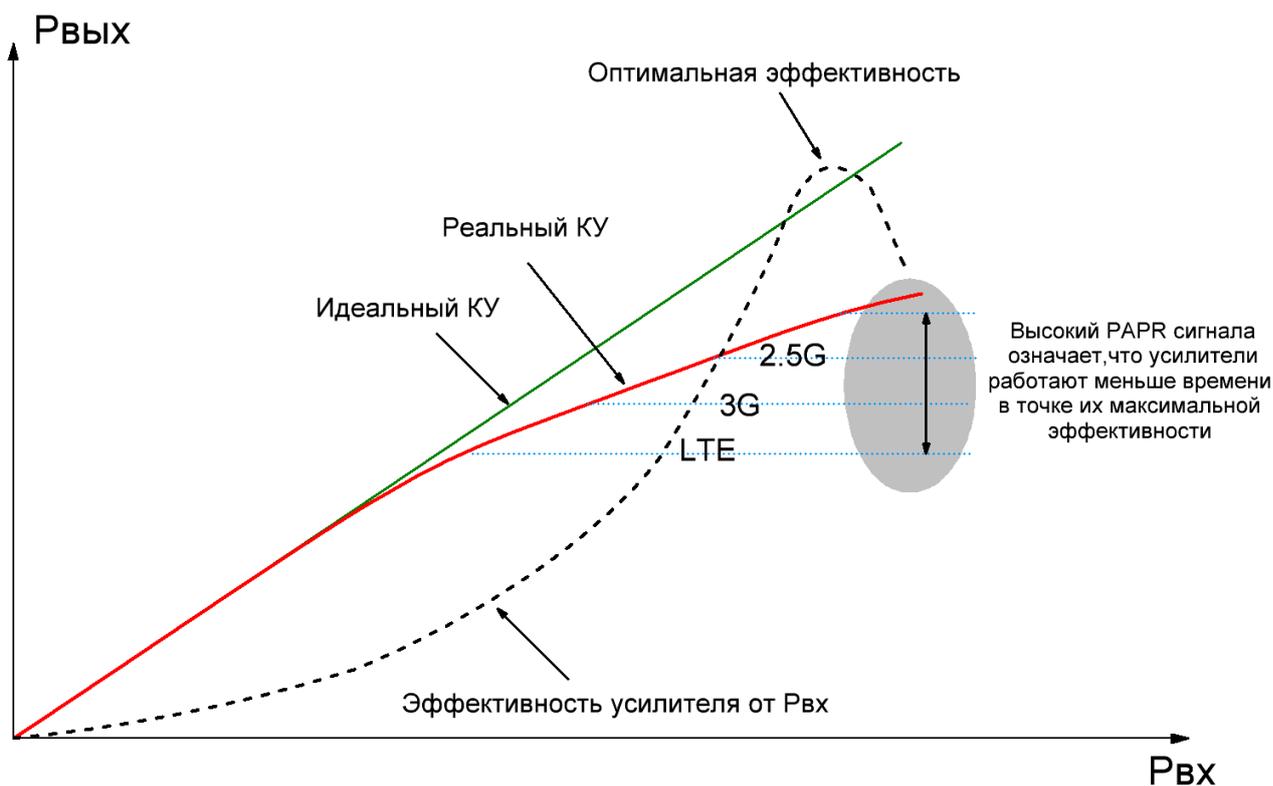


Рис. 1 – Амплитудная характеристика усилителя мощности

Видно, что с ростом уровня входного сигнала существенно снижается коэффициент усиления. Как известно, для оптимальной работы приемопередающего тракта необходимо работать на линейном участке АХ. Также, чем более сложным является сигнал (LTE, UMTS), тем большее искажение он испытывает при усилении. Для примера рассмотрим констелляционную диаграмму сложного сигнала, на который действует нелинейность в виде усилителя (рис. 2):

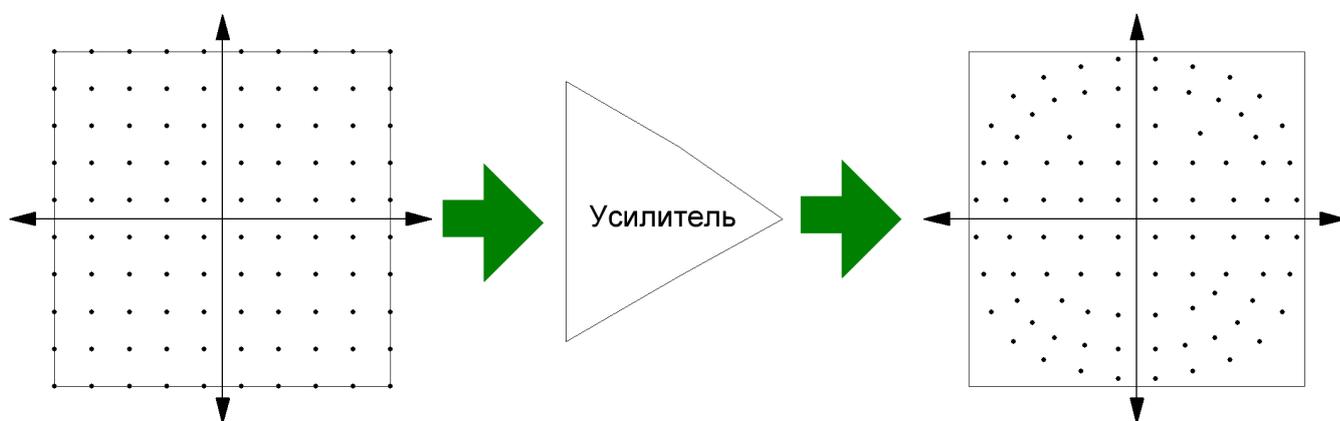


Рис. 2 – Внешний вид констелляционной диаграммы до усиления (слева) и после усиления (справа)

Из констелляционной диаграммы следует, что «внешние» символы с более высоким уровнем мощности усиливаются существенно слабее, чем «внутренние», вызывая существенное отклонение символов от их исходных положений на сигнальном созвездии и увеличение EVM (от англ. error vector magnitude) [4].

Наконец, нелинейные искажения снижают эффективное использование спектра, так как они влияют не только на рабочий диапазон частот усилителя и ППМ соответственно, но и на смежные каналы (рис. 3) [19,20].

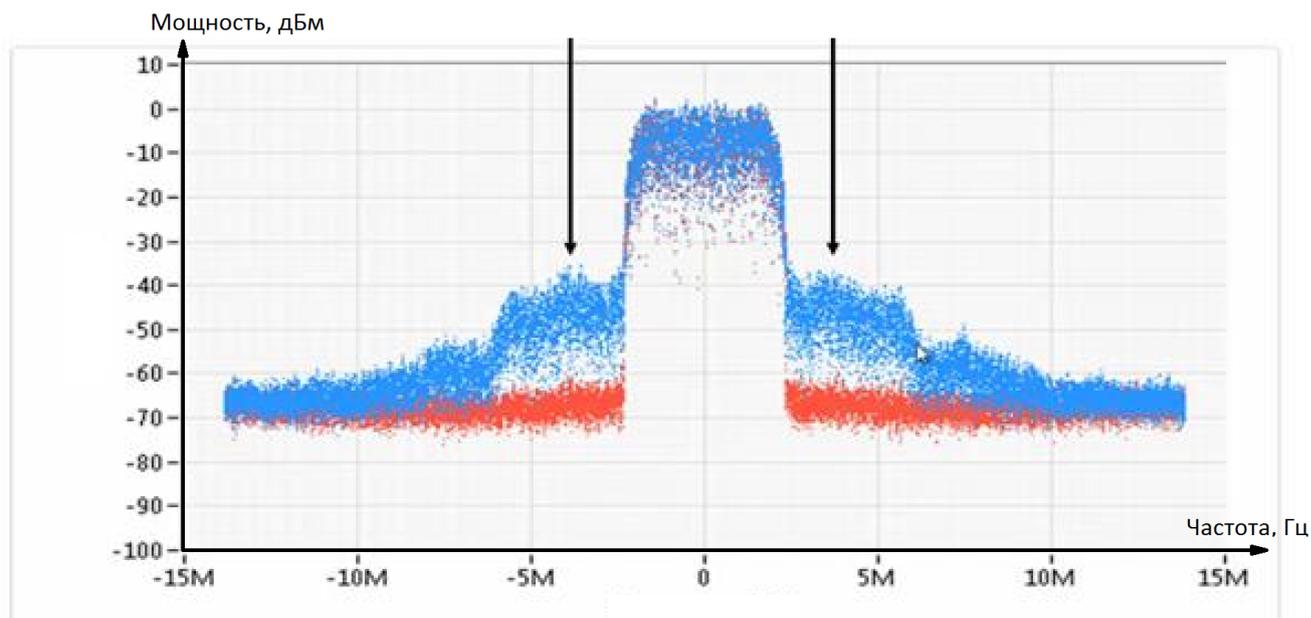


Рис. 3 – Влияние нелинейных искажений в ППМ на смежные каналы

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что современные стандарты связи и передачи данных очень чувствительны к нелинейностям разного рода. Это также определяется высоким уровнем отношения пиковой мощности к среднему уровню (PAPR - Peak to Average Power Ratio). Чем выше это значение, тем меньшее время усилитель работает при максимальной мощности. В таблице 1 приведена информация по основным параметрам всех современных стандартов связи:

| Стандарт | GSM | EDGE | UTMS | HSPA+ | LTE | LTE-A |
|--|---------------------|----------------------|------------|-------------|------------|------------|
| Поколение связи | 2G | 2.75G | 3G | 3.5G | 3.9G | 4G |
| Максимальная пропускная способность канала | 14 kbps | 59,2 kbps | 5,76 Mbps | 100 Mbps | 100 Mbps | 3 Gbps |
| Максимальная полоса сигнала | 200 kHz | 200 kHz | 5 MHz | 20 MHz | 20 MHz | 100 MHz |
| Количество передающих каналов, макс. | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 8 |
| Тип сигнала/модуляции | Single Carrier/GMSK | Single Carrier/8-PSK | WCDMA/QPSK | WCDMA/16QAM | OFDM/64QAM | OFDM/64QAM |
| Типичное значение PAPR | 0 dB | 2 dB | 5,50 dB | 6,50 dB | До 10 dB | До 12 dB |

Таблица 1 – Основные характеристики современных стандартов связи

Как видно из таблицы, за прошедшие 20 лет в процессе совершенствования стандартов связи отношение максимального сигнала к среднему увеличилось на порядок, и на данный момент нет предпосылок для изменения этой тенденции.

Использование ПЛИС в носимых инфокоммуникационных устройствах

Последнее десятилетие ознаменовано существенным ростом рынка носимой мобильной электроники. В связи с необходимостью ускорения вывода носимых устройств на рынок, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) становятся идеальной платформой для разработки подобных устройств, как для бытовых, так и для промышленных применений. Ранее затраты энергии при использовании ПЛИС были крайне высокими, но в последнее время ситуация изменилась, и технологии производства ПЛИС позволили существенно снизить энергопотребление, сделав ПЛИС идеальным решением для обработки сигналов в инфокоммуникационных средствах связи.

Ранее наибольшей энергоэффективности удавались добиться за счет применения динамического энергопотребления, однако при переходе к новым техпроцессам с уменьшением размеров элементов стало возможным также снижать напряжение питания инфокоммуникационных средств. В том числе это способствовало и уменьшению динамической мощности. К сожалению, этот процесс не мог продолжаться бесконечно и, благодаря физике полупроводников, сейчас на первый план вышли токи утечки. Особенно это справедливо для высоких рабочих температур, когда токи утечки могут увеличиваться на порядок и даже более. Именно из-за усилившегося влияния токов утечки и повышения требований к энергетической эффективности, энергонезависимые ПЛИС на базе флэш-памяти способны конкурировать и, в некоторых случаях, даже превосходить специализированные интегральные схемы (ИС).

Новые флэш-ПЛИС исключают пики потребляемого тока, связанные с необходимостью конфигурирования традиционных ПЛИС. Именно это делает возможным реализацию режимов пониженного энергопотребления и сна, которые ранее были доступны только в специализированных или стандартных ИС.

Традиционные ПЛИС на основе ОЗУ теряют всю конфигурационную информацию при переходе в режим сна и, следовательно, при выходе из него требуют повторного конфигурирования, что занимает сотни миллисекунд и требует сотен милливатт потребляемой мощности, делая использование таких режимов бессмысленным. В противоположность этому флэш-ПЛИС позволяют использовать несколько режимов пониженного энергопотребления, в том числе и режимов сна,

точно так же, как и специализированные ИС, так как конфигурационная информация в них не теряется.

Описанные преимущества, а также необходимость обрабатывать данные в режиме реального времени, показывают, что для решения проблемы повышенных требований к вычислительным мощностям при невысоком энергопотреблении наилучшим решением на данный момент является применение ПЛИС. Безусловно, стоит отметить, что данные модули обеспечивают колоссальный прирост в скорости обработки, по сравнению с классическими процессорами.

Цифровые методы устранения нелинейностей

В процессе совершенствования систем связи был разработан метод компенсации нелинейности усилителя, называемый методом внесения предсказаний [5]. Суть метода заключается в использовании цепи обратной связи и компенсации нелинейности усилителя. Компенсация реализуется несколькими методами. Одним из самых популярных методов является включение в цепь специального устройства, модуля предсказаний, который получает на свой вход информацию об отклонении выходного сигнала с усилителя мощности от заданного значения и изменяет сигнал на своем выходе, подавая его на вход усилителя, рис. 4.

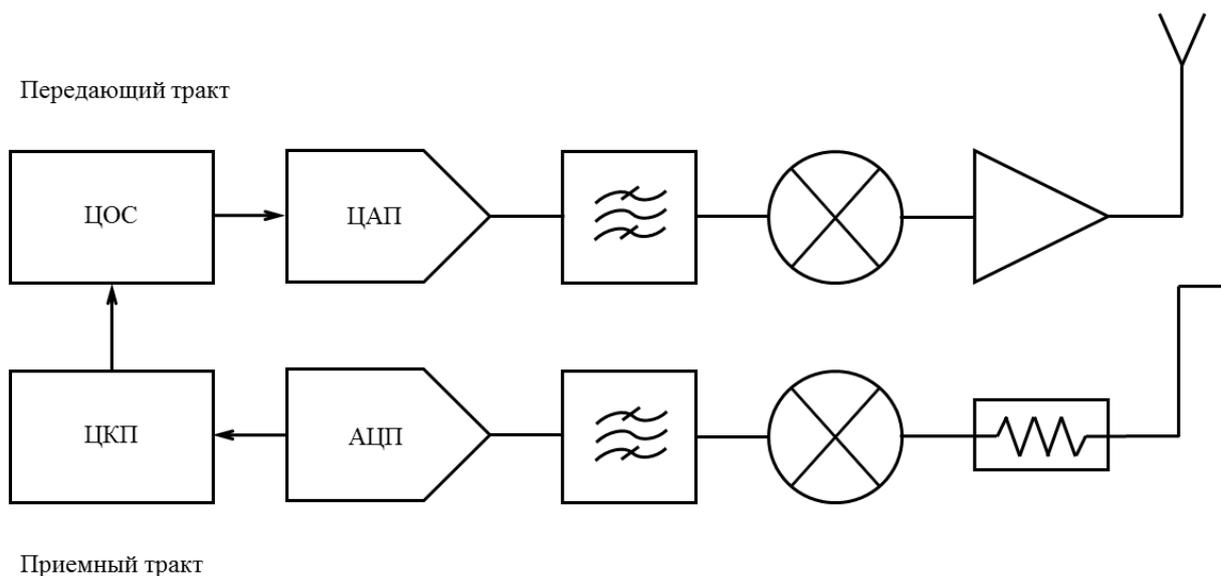


Рис. 4 – Схема включения модуля предискажений в цепь ППМ

Данное изменение приводит к взаимной компенсации нелинейности усилителя. Отношение уровня сходного и выходного сигнала (при разных режимах работы) приведены на рис. 5.

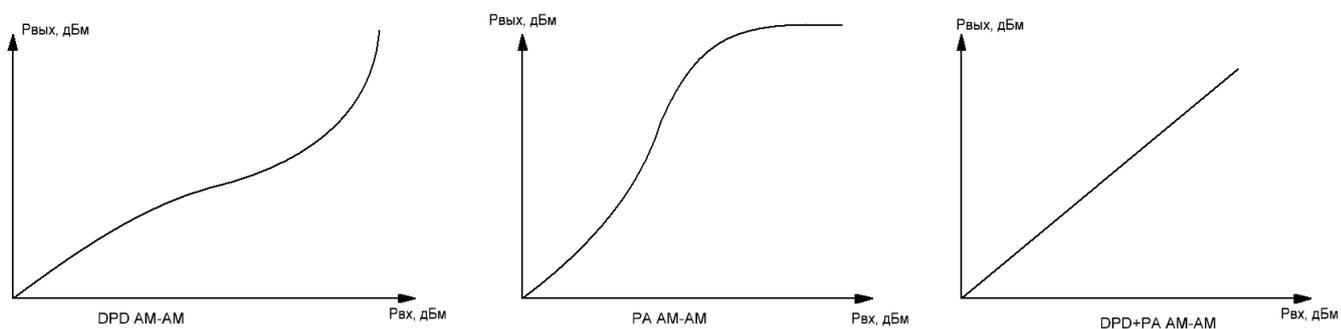


Рис. 5 – Влияние модуля внесения предискажений на выходной сигнал.

Таким образом, установка модуля предискажений вносит изменение в констелляционную диаграмму входного сигнала, тем самым позволяя получить на выходе практически идеальную манипуляцию, с EVM, близким к нулевому[17].

Графически данная компенсация представлена на рис. 6.

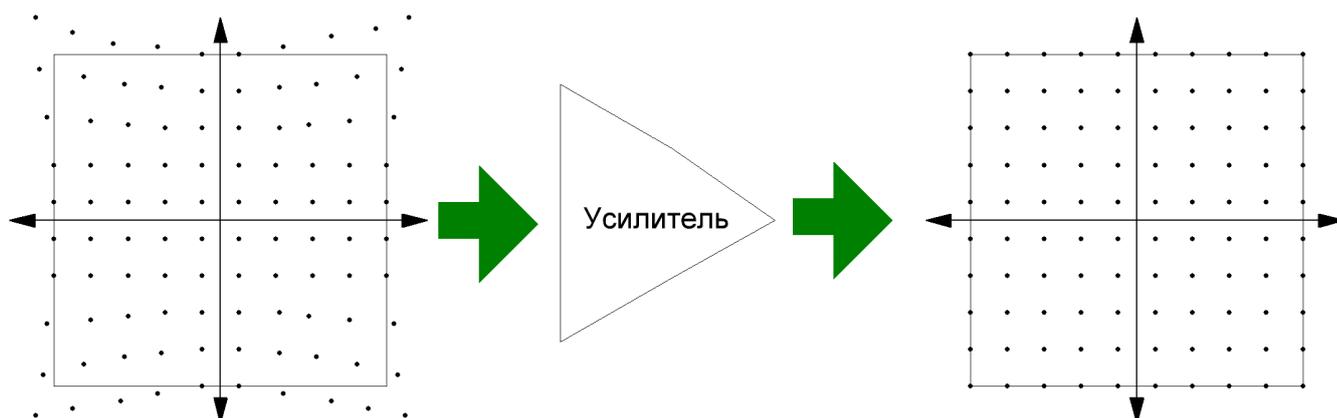


Рис. 6 – Компенсация отклонений в манипуляции сложного сигнала с помощью модуля предискажений

Методы компенсации отклонений выходных сигналов. Особенности.

В настоящее время используется два метода компенсации нелинейностей усилителей: без памяти и с памятью. Основной принцип первого метода был описан выше. Способы реализации данных методов, а также их преимущества и недостатки представлены в таблице 2:

Таблица 2 – Методы компенсации отклонений выходных сигналов

| | Без памяти | С памятью |
|---------------------|--|--|
| Реализация | Измерение амплитудной и амплитудно-фазовой характеристики и создание специально справочной таблицы входных значений с применением численного инвертирования. | Создание специальной меняющейся матрицы предсказаний с использованием полиномов. Корректировка входного сигнала на усилитель зависит не только от выходного сигнала, но и от предыдущего состояния усилителя |
| Преимущества | Простота вычислительных операций. | Существенный выигрыш в EVM при уменьшении мощности, попадающей в соседний канал (ACLR) для широкополосных сигналов, таких как LTE и 802.11 ac |
| Недостатки | Невысокая степень линейаризации, ограниченная полоса для усилителей с памятью. | Для организации данного метода требуются колоссальные вычислительные мощности |

Структурная схема реализации метода компенсации с памятью продемонстрирована на рис. 7.

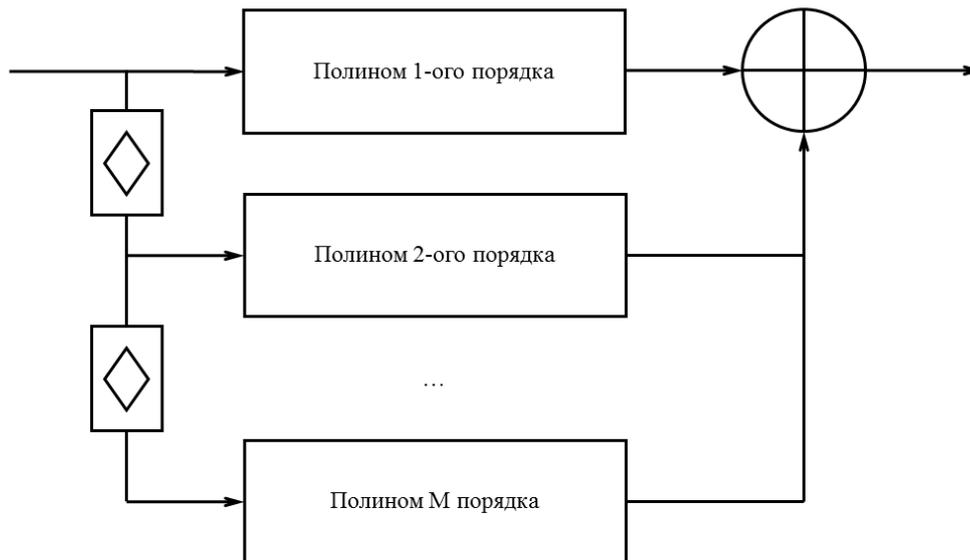


Рис. 7 – Применение полиномов N-порядка в модуле предсказаний.

Описанные преимущества и недостатки показывают, что в современных реалиях все больший акцент делается на модулях предсказаний с памятью. На рис. 8 представлены зависимости EVM и уровня мощности, попадающей в соседний канал от выходной мощности в разных вариантах.

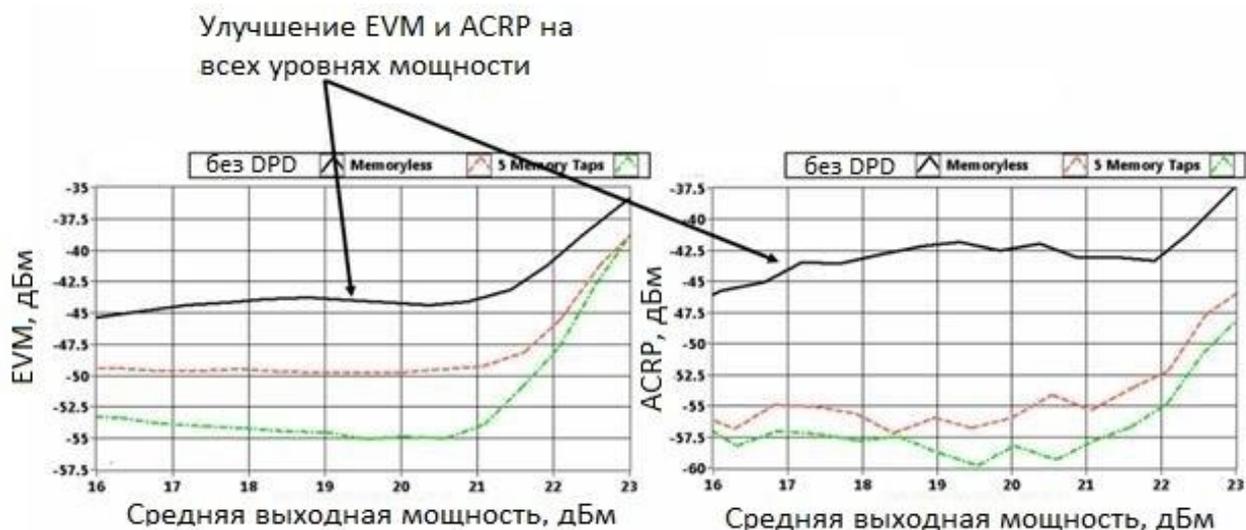


Рис. 8 – Влияние предискажения входного сигнала на выходного сигнала с усилителя.

Из графиков очевидно, что применение предискажения сигнала дает существенное снижение EVM и ACLR (порядка 5 дБ). Разница между методом формирования предискажения без памяти и с памятью составляет еще около 5 дБ. В данном случае, расчет необходимого изменения входного сигнала на усилитель происходил на ПЛИС.

Метод отслеживания огибающей

В системах, где коэффициент усиления (КУ) усилителя относительно невелик появляется термин «эффективность добавленной мощности», который показывает насколько эффективно применение усилителя с учетом затрат на его питание. В носимых терминалах систем сотовой связи усилители не обладают существенным КУ, в то же время вопрос оптимизации потребления энергии стоит крайне остро.

В целях оптимизации расхода потребляемой энергии усилителем разработан метод отслеживания огибающей [3].

Суть метода заключается в снижении напряжения питания, подаваемого на приемный и передающий тракт в тот момент, когда работа усилителя на средней и максимальной мощности не требуется, например, в ждущем режиме или в процессе разговора, когда передача данных непостоянна.

Информация для системы о том, что необходимо снизить напряжение питания на усилитель берется из уровня выходной мощности усилителя. Зная напряжение и ток питания усилителя, а также выходную мощность, можно рассчитать эффективную добавленную мощность PAE (от англ. Power-Added Efficiency) по формуле:

$$PAE = \frac{P_{out_{RF}} - P_{in_{RF}}}{P_{in_{DC}}} \% \quad (1)$$

Графически оптимизация работы усилителя в зависимости от питания, представлена на рис. 9.

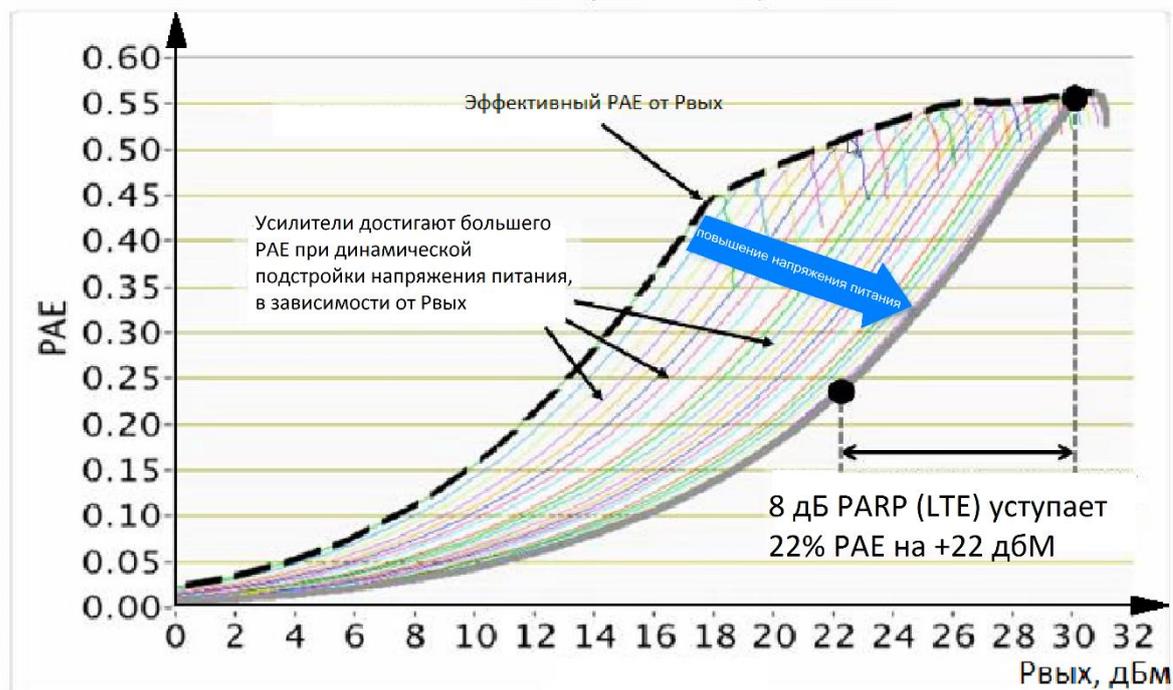


Рис. 9 – Зависимость эффективности добавленной мощности от выходной мощности усилителя.

Из рисунка видно, что при повышении питания на усилитель существенно снижается эффективная добавленная мощность ППМ и задача оптимизации состоит в подборе оптимального для данного момента значения питания усилителя.

На рис. 10 представлено изменение питания усилителя от РЧ мощности на его выходе.

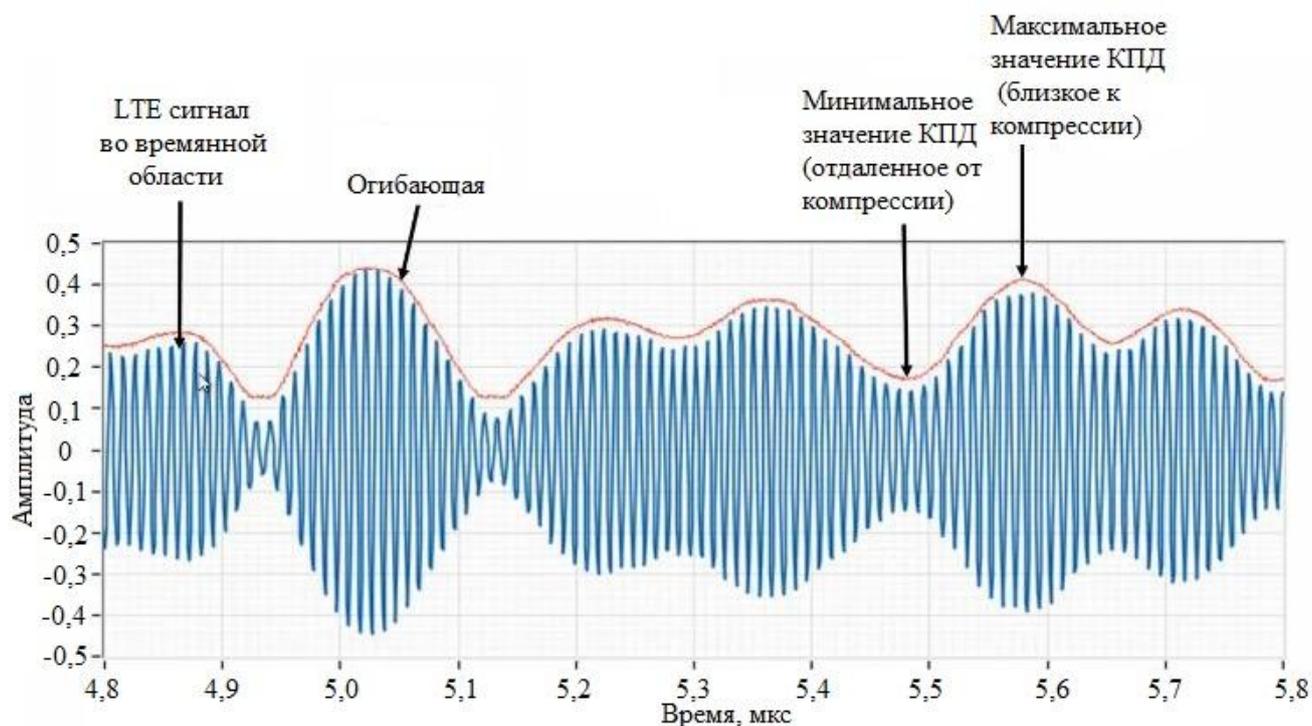


Рис. 10 – Оптимизация уровня питания усилителя

Метод отслеживания огибающей выходного сигнала используется в сочетании с методом внесения предсказаний в систему, что позволяет получить существенный прирост в эффективности работы усилителя и приемо-передающего тракта в целом за счет удержания усилителя в линейном режиме, и при этом на максимальной для этого режима выходной мощности [10].

Описанные методы актуальны как для применения в существующих инфокоммуникационных системах и радиолокации, так и в перспективных системах, где требования к энергоэффективности будут еще жестче, а сигналы существенно усложнятся [13,14,15,16].

Результаты измерений

Как говорилось ранее, основной идеей метода отслеживания огибающей выходного сигнала является динамическое изменение напряжения питания усилителя мощности в соответствии с огибающей входного ВЧ сигнала, с которым работает усилитель [11]. Данный метод позволяет увеличить добавленную мощность и энергопотребление усилителя, что, в случае, когда система питается от батареи, является крайне актуальной задачей.

Задача: снижение энергопотребления усилителя ВЧ мощности, используя метод отслеживания огибающей выходного сигнала (Envelope Tracking, далее ET), в сочетании с методом внесения цифровых предискажений (Digital Predistortion, далее DPD) для понижения энергопотребления усилителя мощности сигнала (далее УМ).

Принцип работы системы следующий: генерируемый I/Q сигнал конвертируется в ВЧ-сигнал и поступает на вход УМ. Также на основании I/Q сигнала рассчитывается огибающая ВЧ-сигнала. Огибающий сигнал поступает на модулятор, где происходит модуляция напряжения источника питания УМ [9].

Для решения данной задачи потребовалось: генератор ВЧ сигнала для исследуемого УМ, генератор огибающего сигнала, синхронизированного с ВЧ генератором, источник питания и модулятор для модуляции питающего напряжения, анализатор сигнала/спектра и щупы для измерения напряжения питания и тока питания УМ через резистор.

Состав системы:

- Генератор векторных сигналов Rohde&Schwarz SMW200A (100 кГц ÷ 3 ГГц) с опцией метода отслеживания огибающей выходного сигнала SMW-K540 [8]
- Анализатор сигнала и спектра Rohde&Schwarz FSW с опцией измерения параметров усилителей FSW-K18
- Источник питания напряжения постоянного тока
- Тестирующая плата в виде исследуемого усилителя мощности и модулятора

Схема подключения измерительной системы представлена на рис. 11. Схема

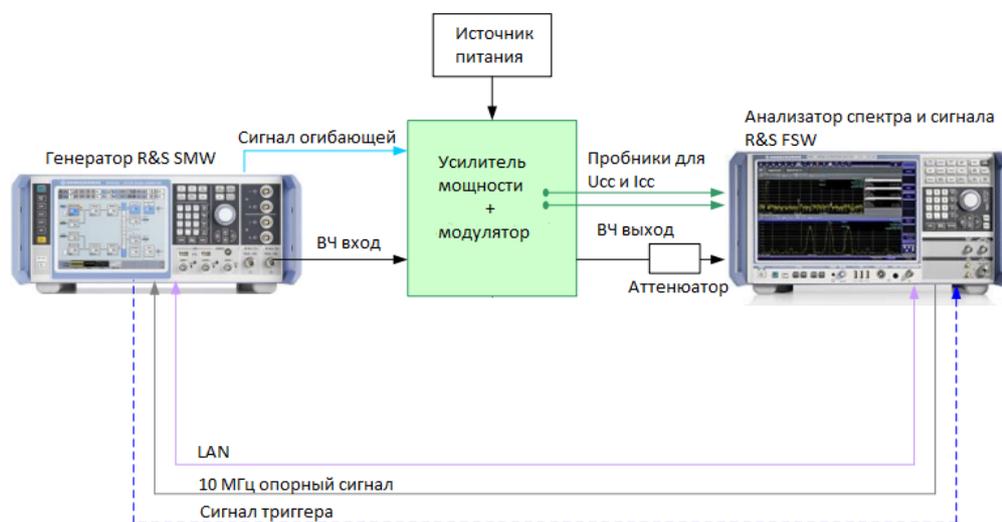


Рис. 11 – Схема подключения системы для измерения параметров усилителя мощности с использованием методов МВООС и МВП

Генератор R&S SMW генерирует как ВЧ сигнал для усилителя, так и I/Q сигнал для огибающей и обеспечения модуляции питания, в зависимости от тестового ВЧ сигнала, что значительно упрощает задачу тестирования. Расчет сигнала огибающей производится по формуле 2[7]:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2)$$

Модулирующий сигнал подается на специальную плату, основную часть которой состоит из модулятора питания для метода отслеживания огибающей TI LM3290 и линейного усилителя TI LM3291. Соединенные через последовательный интерфейс, LM3290 управляет LM3291 и на выходе с платы поступает модулированный сигнал на ВЧ усилитель PA1. Схема тестировочной платы представлена на рис. 12:

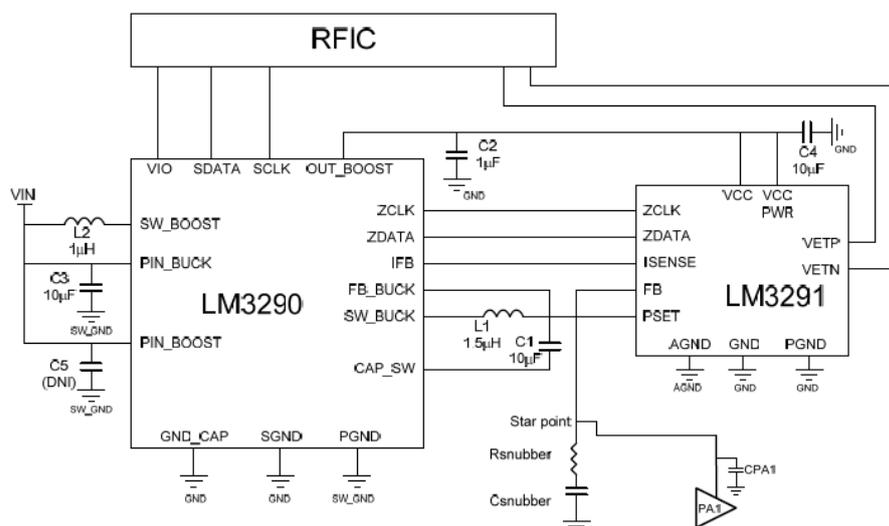


Рис. 12 – Схема платы для формирования модулированного напряжения питания

Анализатор спектра и сигналов R&S FSW [18] с подключенными ко входу дифференциальными пробниками и ВЧ-выхода с усилителя позволяет измерить всю необходимую информацию о потребляемой мощности усилителя и спектре выходного сигнала [6], а также построить график во временной области (рис. 13).

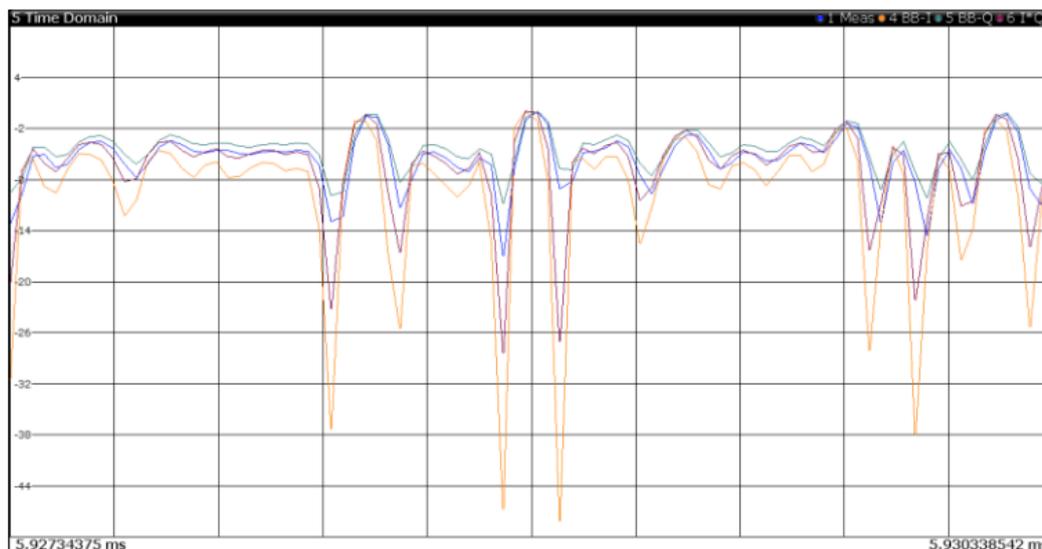


Рис. 13 – Отображение параметра выходного ВЧ сигнала (синий), напряжения питания (зеленый), тока питания (оранжевый), потребляемой мощности (фиолетовый) во временной области.

Как видно из графика, изменение выходной мощности сигнала сопровождается изменением питающей мощности. При уменьшении выходной мощности, уменьшается потребляемая мощность, что наглядно демонстрирует описанный ранее метод оптимизации потребления питания усилителей [12].

Библиографический список

1. Carroll A. Heiser G. An Analysis of Power Consumption in a Smartphone // USENIXATC'10 Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference, Boston, MA, June 23-25, 2010, pp. 21.
2. Potter C. Envelope Tracking for Enhanced Power Amplifier Efficiency // 2014 Seminar Cambridge, UK, 2014.
3. Teikari I. Digital predistortion linearization methods for RF power amplifiers, Doctoral dissertation, Helsinki University of Technology, 2008, 209 p.
4. Ding L. Digital Predistortion of Power Amplifiers for Wireless Applications, PhD Thesis, Georgia Tech Theses and Dissertations, 2004, 117 p.
5. Sills J.A., Sperlich R. Adaptive Power Amplifier Linearization by Digital Pre-Distortion with Narrowband Feedback using Genetic Algorithms // Proceedings RAWCON 2002, IEEE Radio and Wireless Conference, 2002, pp. 54 - 59.
6. Rohde & Schwarz. Envelope Tracking and Digital Pre-Distortion Test Solution for RF Amplifiers. Application note, available at: https://pdfs.semanticscholar.org/f414/897c569f5fefa8debbec04027762e5f4ed63.pdf?_ga=2.240283075.138795741.1532694284-1564849164.1532694284
7. Rohde & Schwarz. R&S®SMW-K540, R&S®SMW-K541 Envelope Tracking and AM/AM, AM/PM Predistortion. User Manual, available at: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/s/smw200a_1/digital_standards_smw/SMW_EnvelopeTracking_DPD_UserManual_en_14.pdf

8. Rohde & Schwarz. R&S®SMW200A. Specifications, available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/SMW200A_dat-sw_en_3606-8037-22_v0800.pdf
9. Steven Baker. ET101 An Introduction to Envelope Tracking for RF Amplifiers, White Paper, 2011, available at: https://www.mikrocontroller.net/attachment/276463/ET101_An_Introduction_To_Envelope_Tracking_RF_Amplifiers_1.0_.pdf
10. Aitto-oja T. High Efficiency Envelope Tracking Supply Voltage Modulator for High Power Base Station Amplifier Applications // IEEE Microwave Symposium Digest, 2010, pp. 668 – 671.
11. Wang Z. Envelope Tracking Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, Inc. Norwood, MA, USA, 2014, pp. 170 - 171.
12. Wang Z. Ma R., Lanfranco S. An Envelope Tracking Power Amplifier for LTE-A Base Station // Proc. of IEEE Topical Symposium on Power Amplifiers for Wireless Communications, 2011, pp. 83 - 94.
13. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>
14. Бородин В.В., Петраков А.М. Анализ алгоритмов управления адаптивной сетью передачи данных по локальным параметрам // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57035>

15. Назаренко А.П., Сарьян В.К., Лутохин А.С., Сущенко Н.А. Использование летающих систем Интернета Вещей до, во время и после катастрофической фазы чрезвычайной ситуации // Электросвязь. 2015. № 7. С. 12 - 15.
16. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение БЛА в задачах наблюдения // IX Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов»: Сборник докладов. (Москва, 25 - 27 мая 2005). - М.: Изд-во МАИ, 2012, С. 59 - 62.
17. Шутов В.Д. Линеаризация СВЧ усилителей мощности методом цифровых предсказаний. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Воронежский государственный университет, 2015, 146 с.
18. Rohde & Schwarz. R&S@SMW200A. User Manual, available at: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/f/fsw_1/FSW_UserManual_en_41_web.pdf
19. Attarzadeh N., Mehrani M.A. New Three Dimensional Clustering Method for Wireless Sensor Networks // Global Journal of Computer Science and Technology, April 2011, vol. 11, issue 6, version 1.0.
20. Руководство по среде моделирования GPSS World, URL: http://www.minutemansoftware.com/tutorial/tutorial_manual.htm