

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАЛЬНОГО КАНАЛА СВЯЗИ,  
ПОСТРОЕННОГО НА БАЗЕ АДАПТИВНОЙ АНТЕННЫ  
С ПАССИВНЫМИ РАССЕИВАТЕЛЯМИ**

М.О. Шуралев, А.Л. Умнов, М.А. Соколов, А.Ю. Ельцов

*Нижегородский госуниверситет*

Применение антенн с высоким коэффициентом усиления, направлением излучения и приема которых можно управлять электрически, представляется перспективным в современных массовых беспроводных системах связи, поскольку это дает ряд преимуществ, таких как:

- установление стабильной связи требуемого качества с мобильными объектами;
- организация каналов связи, защищенных от прослушивания;
- электронная компенсация механических отклонений антенных конструкций, которые могут быть вызваны различными нежелательными факторами (ветер, разрушение опор и т.п.);
- организация пространственно-временного разделения каналов связи с использованием одной антенны;
- реконфигурация топологии сети, состоящей из множества узлов;
- возможность борьбы с помехами, формированием максимумов и минимумов диаграммы направленности в соответствующих направлениях.

Исследуемая антенна [1] работает в диапазоне частот 2,4 GHz с коэффициентом направленного действия, превышающим 21 дБи. Направлением главного лепестка ее диаграммы направленности можно управлять в горизонтальной

и вертикальной плоскостях ( $\pm 60^\circ/\pm 20^\circ$ ).

В конструкции антенны зеркало формируется несколькими рядами рассеивателей. При этом каждый ряд имеет несколько слоев. Геометрические размеры рассеивателя, параметры его нагрузки, расстояния между рассеивателями в зеркале – все это

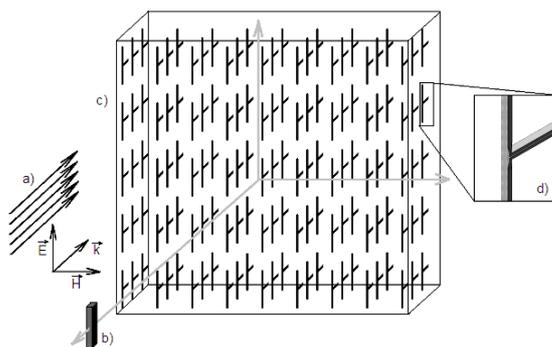


Рис. 1: а) – падающая плоская волна, б) – приемный элемент, подключаемый к СВЧ приемнику, в) – «зеркало» антенны, д) – пассивный рассеиватель.

должно быть подобраны таким образом, чтобы удовлетворить заданным требованиям по коэффициенту усиления антенны, диапазону сканирования, габаритам, стоимости антенны и ряду других параметров.

Полевые испытания с антенной системой проводились в городских условиях с установлением связи между двумя точками внутри города и между точками находящимися в двух соседних городах, разделенных рекой.

Схема каналов связи через реку представлена на рис. 2. Исследуемая адаптивная антенна, подключенная к спектроанализатору или специализированному Wi-Fi приемнику, располагалась в г. Нижний Новгород на 9 этаже офисного здания (1) – высота 30 м от уровня Земли. В трех точках в г. Бор (Нижегородская обл.) – роддом (2), школа (3), частный дом (4) – с которыми устанавливалась связь, размещались стандартные параболические антенны с коэффициентом направленного действия 24 дБи, подключенные к генераторам СВЧ сигналов на частоте 2,4 ГГц или к специализированным Wi-Fi передатчикам.

Эксперимент состоял в настройке диаграммы направленности антенны на источник сигнала с последующей установкой связи по протоколу 802.11b и измерением максимально достижимой скорости передачи данных по этому протоколу с использованием адаптивной антенны. Каждая антенна была подключена к устройствам беспроводной связи Gateworks Avila Network Processing System (GW2348-4) с сетевыми адаптерами 600mW Ubiquity XR2 802.11bg. Измерения производились с помощью копирования по протоколу TCP/IP из точки 1 в точки 2, 3 и 4 случайно сгенерированного файла объемом 10 МБ и контроля времени копирования для различных частотных каналов. В результате производительность системы составила от 6,17 Мбит/с до 7,53 Мбит/с (6,85 Мбит/с  $\pm 10\%$ ), что сопоставимо с результатами исследований, опубликованных в [2]. При этом можно управлять главным лепестком диаграммы направленности и использовать другие преимущества антенной системы.

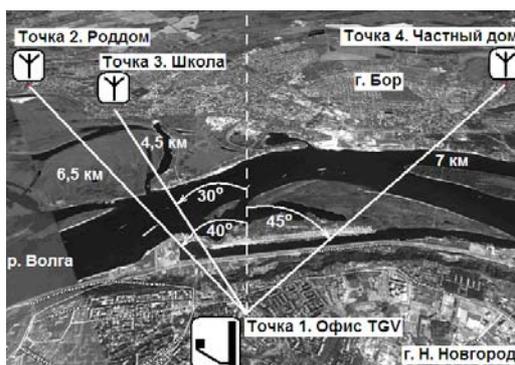


Рис. 2

- [1] Filimonov V., Mainwaring A., Shishalov I., Shuralev M., Umnov A. // Proc. of IEEE Sarnoff Symposium. NJ, USA: Nassau Inn in Princeton, 2007.
- [2] Chebrolu K., Raman B., Sen S. // In Proc. of ACM Mobicom'06. California, USA: Los Angeles, 2006.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АДАПТИВНОЙ АНТЕННЫ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ СЕТИ СТАНДАРТА 802.11

М.А. Сорокин, И.Г. Лебедев, А.Ю. Ельцов

*Нижегородский госуниверситет*

В настоящее время широкое распространение получили технологии беспроводных локальных компьютерных сетей. Наиболее известная из них – технология WiFi (стандарт IEEE 802.11 [1]). Одним из ее недостатков является низкая мощность передающих устройств, и, как результат этого ограничения, – малый радиус покрытия сети (100-300 метров на открытых пространствах и несколько десятков метров в помещениях при наличии капитальных перегородок). С удалением от источника связь становится возможной уже только на низких битовых скоростях, требующих меньшей мощности принимаемого сигнала.

Для расширения зоны покрытия сети при фиксированных ограниченных мощностях передатчиков могут быть использованы антенны с узкой диаграммой направленности (ДН). Поскольку заранее установить форму требуемой ДН часто бывает весьма затруднительно, а также для учета возможностей изменения условий связи, в процессе работы сети удобнее использовать антенны с управляемой диаграммой направленности – адаптивные антенны.

Адаптивная антенна, используемая в эксперименте, представляет собой систему, состоящую из излучающего элемента и 14 пассивных рассеивателей с управляемым импедансом, расположенных радиально по отношению к излучателю. Диаграмма направленности формируется путем подбора напряжений смещения на рассеивателях. Эта задача может быть решена с помощью оптимизации по заданному критерию [2], простейшим из которых является максимальная сила сигнала от полезного узла.

В ходе исследования эффективности применения адаптивных антенн для улучшения качества связи в условиях помещения был проведен следующий эксперимент. На рис. 1 представлена схема измерительной установки.



Рис. 1

Персональный компьютер (ПК1) подключен к маршрутизатору Linksys WRT54GL, оборудованному адаптивной антенной и системой ее управления. Указанный маршрутизатор подключается по радиоканалу в режиме клиента к точке

доступа (D-Link DWL-2100AP), которая в свою очередь подключена ко второму персональному компьютеру (ПК2).

В ходе эксперимента измерялся процент успешно прошедших пакетов, время отклика и скорость передачи данных между ПК1 и ПК2 до и после оптимизации направленности. Диаграмму направленности адаптивной антенны до проведения оптимизации (при нулевых напряжениях на рассеивателях) можно считать изотропной. Эксперимент проводился в усло-

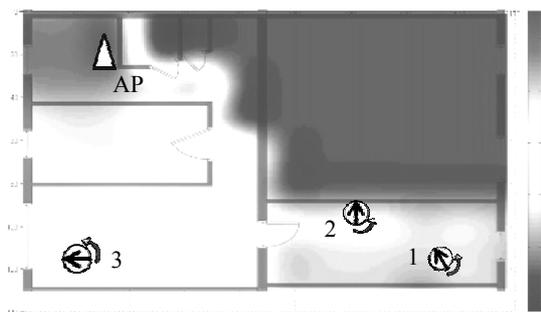


Рис. 2

виях жилого помещения, в трех точках с различными уровнями принимаемой мощности от точки доступа. На точке доступа выставлена фиксированная минимальная мощность. На рис 2 представлено качественное распределение мощности WiFi сигнала, снятое экспериментально при помощи мобильного ПК, и отмечены точки, в которых проводились измерения скорости. Распределение качественно соответствует уровню показателя мощности, принимаемому маршрутизатором с адаптивной антенной. Уровень -85 дБм (темно серый участок на рис. 2) указан для тех областей, в которых измерение уровня сигнала было невозможно. Улучшения от применения исследуемой антенны ожидалось на границе области покрытия точки доступа, где мощность полезного сигнала ниже чувствительности приемника на величину, меньшую, чем максимальный коэффициент усиления антенны. В таблице приведены усредненные результаты проведенных оптимизаций.

Таблица

| Место:                         | Точка 1 |        | Точка 2 |        | Точка 3 |        |
|--------------------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                                | До:     | После: | До:     | После: | До:     | После: |
| Прошедшие пакеты, %:           | 36,40   | 98,17  | 91      | 98     | 98,90   | 98,68  |
| RTT(round-trip time), мс       | 24,75   | 6,11   | 10,16   | 3,40   | 2,39    | 2,36   |
| Скорость передачи данных, МБ/с | 0,00    | 0,29   | 0,01    | 0,97   | 1,49    | 1,67   |

Исходя из усредненных результатов экспериментов, можно сделать вывод, что использование адаптивной антенны позволяет расширить зону покрытия беспроводной сети, сделав возможной стабильную связь в тех местах, в которых при использовании обычных антенн связь была невозможна (точка 1), а также повысить скорость и стабильность передачи данных при приближении к точке доступа вплоть до выхода на максимальную пропускную способность, поддерживаемую исполь-

зующим оборудованием (точка 2). Эффективность применения адаптивной антенны заметно снижается в местах с достаточным уровнем сигнала (точка 3). Поэтому на основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что адаптивные антенны с характеристиками, подобными экспериментальной, могут применяться для подключения удаленных узлов в существующих беспроводных сетях и обеспечивать качественное соединение наравне с сохранением гибкости сети в тех местах, где использование фиксированных антенн затруднено или невозможно.

- [1] ANSI/IEEE 802.11 Std 1999 Edition (R 2003), IEEE-SA Standard Board, 2003.
- [2] Han Q., Briend V., Ohira T. // Proc. of the 9<sup>th</sup> European Conference on Wireless Technology. 2006. P. 59.
- [3] Ельцов А.Ю. // Труды 11-й научной конф. по радиофизике 7 мая 2007 г. /Ред. А.В.Якимов. Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2007. С. 239.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ  
НА ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ АНТЕННЫ  
НА ОСНОВЕ ПАССИВНЫХ РАССЕИВАТЕЛЕЙ:  
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**И.В. Есин<sup>1,2)</sup>, И.С. Шишалов<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>*Нижегородский госуниверситет*

<sup>2)</sup>*ООО «ЛБС Групп»*

Задача позиционирования мобильных объектов в сенсорных сетях может быть решена путем определения пеленга на источник излучения при помощи адаптивных антенн на основе пассивных рассеивателей и дальнейшей триангуляции [1]. В данной работе исследуется адаптивная антенна с достаточно широкой диаграммой направленности. В связи с этим задача точного определения пеленга на источник излучения в условиях многолучевости существенно затрудняется. В работе проведено численное исследование точности определения направления на источник излучения с помощью адаптивной антенны.

Для моделирования структуры электромагнитного поля на заданном рельефе местности использовалось приложение Radiowave Propagation Simulator (RPS) [2] – симулятор распространения радиоволн в лучевом приближении. При помощи симулятора были получены данные, содержащие информацию обо всех лучах, приходящих от излучателя на частоте 2,4 ГГц к приемнику (мощность сигнала, направление прихода, фаза и т.д.). Излучатель считался всенаправленным, на стороне приемника располагалась исследуемая антенна. Для внесения параметров антенны в модель был проведен ряд экспериментов в безэховой антенной камере по оптимизации и измерению диаграмм направленности. Было получено 36 диаграмм, оптимизация которых производилась при изменяемом направлении на источник с шагом 10° относительно выбранного нуля отсчета. Зная информацию о каждом луче, а также о параметрах используемых антенн, можно вычислить суммарную мощность,

принимаемую при данной ориентации диаграммы направленности приемной антенны.

В результате были построены эталонные зависимости мощности принимаемого сигнала от направления максимума для диаграмм снятых в антенной камере при направлении на источник изменяемом с шагом  $10^\circ$ . В качестве примера график

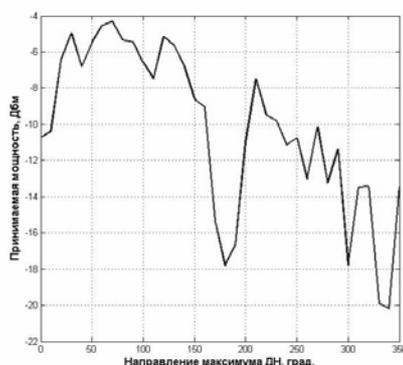


Рис. 1

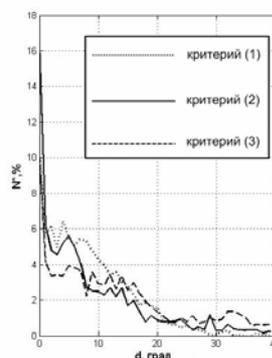


Рис.2

зависимости при ориентации на источник  $70^\circ$  приведен на рис. 1. При моделировании работы системы с использованием RPS подобные зависимости были также получены и в условиях многолучевого распространения на заданном рельефе местности и при определенном взаимном расположении источника и исследуемой антенны.

Определение пеленга по полученным зависимостям осуществлялось несколькими способами.

Во-первых, по максимуму принимаемого сигнала:

$$g_i \rightarrow \max, \quad (1)$$

$i=1, N=36$

Здесь  $g$  – зависимость, получаемая в результате моделирования;  $N$  – количество снятых диаграмм направленности. Пеленг на источник определяется из условия максимума принимаемой мощности при изменении ориентации максимума диаграммы направленности.

Во-вторых, задачу определения пеленга можно свести к задаче поиска соответствия зависимости принимаемой мощности, получаемой в процессе моделирования, одной из эталонных зависимостей  $f$  вида рис. 1, получаемых для диаграмм, измеренных в антенной камере. Критерием соответствия может быть условие минимума модуля разности:

$$\sum_{i=1}^{N=36} |f_i - g_i| \rightarrow \min. \quad (2)$$

Другим критерием может служить условие максимума корреляции эталонной и получаемой при численном моделировании зависимостей:

$$\prod_{i=1}^{N=36} f_i \cdot g_i / \sum_{j=1}^{N=36} f_j \rightarrow \max. \quad (3)$$

Распределение ошибки определения направления приведено на рис. 2. Здесь  $d=|\alpha^* - \alpha|$ , где  $\alpha^*$  – истинное направления на источник,  $\alpha$  – направление, определяемое по приведенным критериям.  $N^*$  – количество точек координатной сетки в %, в которых ошибка определения пеленга равна  $d$  градусов.

Таким образом, в работе было исследовано три метода определения направления на источник излучения. Выявлено, что критерий (2) дает наибольшую точность определения пеленга.

В дальнейшем планируется разработка и исследование методов определения местоположения источника по пеленгам, полученных с нескольких узлов сети согласно критерию (2).

[1] Chen J.C., Kung Y., Hudson R.E. // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. V.19. Issue 2. P. 30.

[2] <http://www.wi-fitechnology.com/displayarticle2415.html>

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ АНТЕНН С ЭЛЕКТРОННЫМ СКАНИРОВАНИЕМ ЛУЧА

О.А. Громазин<sup>1,2)</sup>, И.С. Шишалов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет

<sup>2)</sup>ООО «ЛБС Групп»

Задача обнаружения движущихся объектов, решение которой необходимо, например, для построения охранных систем, решалась и решается в настоящий момент многими. В данной работе исследована система обнаружения движения, построенная на основе адаптивных антенн с электронным сканированием луча.

Для моделирования обнаружения движения использовался программный продукт Radiowave Propagation Simulator (RPS) – симулятор распространения радиоволн в лучевом приближении [1]. Для исследования необходимых зависимостей в RPS задавался рельеф окружающей местности, координаты излучателей и приемников. В качестве объекта для обнаружения была выбрана входящая в поставку RPS модель человека [2].

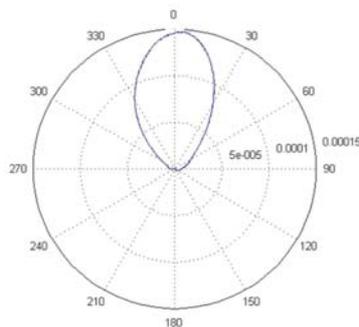


Рис. 1

Располагая приемник и передатчик на различных расстояниях друг от друга (10, 15, 24 и 50 метров) и перемещая модель человека поперек оси излучатель-приемник, мы получали значения мощности лучей, приходящих на приемник. В качестве передающей антенны был выбран диполь. Высота расположения антенн 1,5 метра. Приемная антенна в RPS изотропная, а требуемая диаграмма направленности накладывалась на полученные результаты при их обработке. Использовалась диаграмма направленности реальной антенны, которая предварительно была снята в безэховой антенной камере (рис. 1). При наложении диаграмма нормировалась по своему максимуму так, чтобы он равнялся 0 дВ.

Для мощностей принимаемого сигнала при каждом проходе человека были построены графики, один из которых приведен на рис. 2. Данная зависимость получена при проходе человека на расстоянии 5 м от передатчика при расстоянии между передатчиком и приемником в 15 м. По вертикальной оси отложена мощность принимаемого сигнала в дВт, а по горизонтальной – поперечная координата модели человека в метрах. Поперечная координата приемника и передатчика – 5 м.

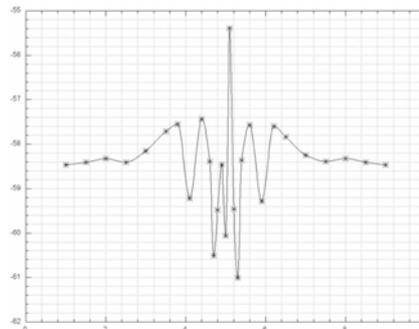


Рис. 2

Как можно заметить, мощность сигнала имеет довольно сложную зависимость. Более того, вид данного графика зависит от расстояния между человеком и источником излучения. Следовательно, для оценки системы необходимо построить график зависимости мощности сигнала от положения человека в пространстве для каждой возможной точки.

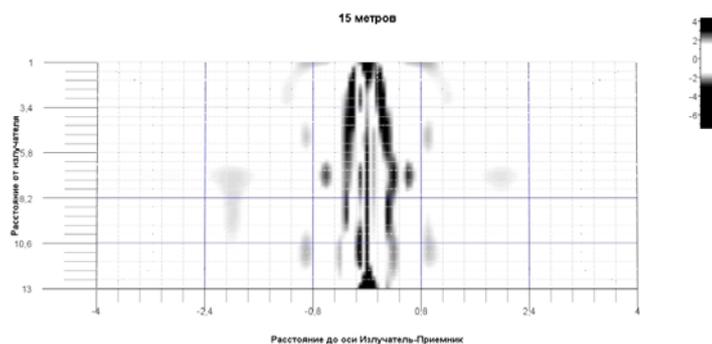


Рис. 3

На рис. 3 представлен график, на котором построена разностная мощность принимаемого сигнала при нахождении человека в заданной точке и при его отсут-

ствии. Из полученной зависимости можно сделать несколько выводов. Во-первых, детектирование факта прохода человека по пороговому методу не эффективно, поскольку области значительного изменения мощности сигнала узки. Поэтому в дальнейшем будут проводиться исследования влияния различных алгоритмов детектирования объекта на чувствительность и надежность системы, например, с помощью алгоритма, построенного на определении скорости изменения мощности, а не самой мощности. Во-вторых, в ходе работы были обнаружены погрешности модели, связанные в первую очередь с радиолучевым приближением, поэтому далее будут проведены натурные эксперименты для подтверждения и корректировки модели.

[1] <http://www.wi-fitechnology.com/displayarticle2415.html>

[2] Alomainy A., Hao Y., Yuan Y. and Liu Y. // In Proc. of the 9<sup>th</sup> European Conference on Wireless Technology (ECWT '06), Manchester, UK, 2006.

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМ COMPUTER VISION НА МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Д.А. Ильина, Д.А. Головачев, И.М. Миронов

*Нижегородский госуниверситет*

Производительность мобильных устройств в настоящее время постоянно растёт. Это даёт возможность с их помощью решать задачи, которые раньше были под силу только персональным компьютерам. Одной из таких задач является использование алгоритмов машинного зрения на мобильных устройствах. Это расширит их функциональность и позволит обрабатывать мультимедиа информацию, получаемую со встроенных фото и видео камер.

Целью данной работы было портирование системы машинного зрения на мобильную платформу и изучение производительности алгоритмов машинного зрения на мобильных устройствах. В качестве системы машинного зрения была выбрана open source библиотека OpenCV.

OpenCV (Open Source Computer Vision) – это библиотека алгоритмов машинного зрения и численных методов общего назначения. Она является одной из наиболее известных open source библиотек машинного зрения, распространяющихся в условиях лицензии BSD, и может свободно использоваться для коммерческих и академических целей. Данная библиотека была реализована на языке C/C++, но также разрабатывается для Python, Ruby, Matlab, Lua и других языков [1].

В ходе проекта были пройдены следующие этапы:

- Собрана библиотека OpenCV под архитектуру процессоров ARM.
- Библиотека OpenCV портирована на мобильную платформу.
- Были реализованы 3 теста для исследования производительности.
- Тесты были запущены на персональном компьютере и мобильных устройствах Nokia N810 и Nokia N900.

Было проведено исследование производительности на следующих тестах: линейная фильтрация, распознавание лица, отслеживание движущихся объектов.

Были получены следующие результаты.

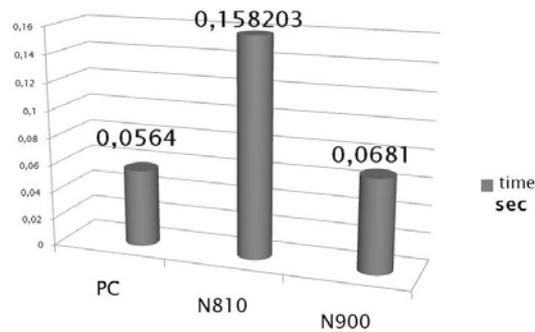


Рис. 1. Линейная фильтрация одного изображения

На рис. 1 изображена диаграмма времени (в секундах) обработки одного изображения. По результатам теста можно сделать вывод, что время работы алгоритма на Nokia N900 практически совпадает со временем работы алгоритма на персональном компьютере.

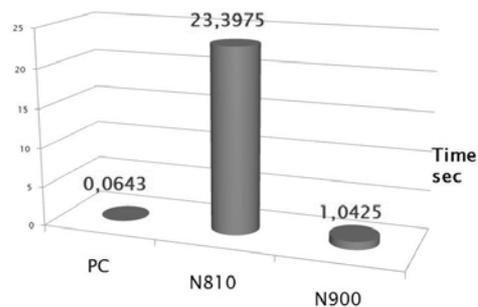


Рис. 2. Распознавание лица

На рис. 2 показано время (в секундах) работы алгоритма поиска лиц на одном изображении. По результатам тестирования заметно большое различие в быстроте действия мобильных устройств. Это объясняется тем, что Nokia N900 имеет в наличии встроенный 3d-ускоритель с поддержкой OpenGL 2.0.

На рис. 3 изображено время (в секундах) обработки 50 кадров, а также число кадров в секунду (FPS). По результатам данного теста можно сказать, что пока мощности мобильных устройств не достаточно для обработки видео потока алго-

ритмами машинного зрения в реальном времени. Тест на отслеживание движения не удалось реализовать для устройства Nokia N810 в связи с тем, что OpenCV не поддерживает возможность видео-захвата с данного устройства.

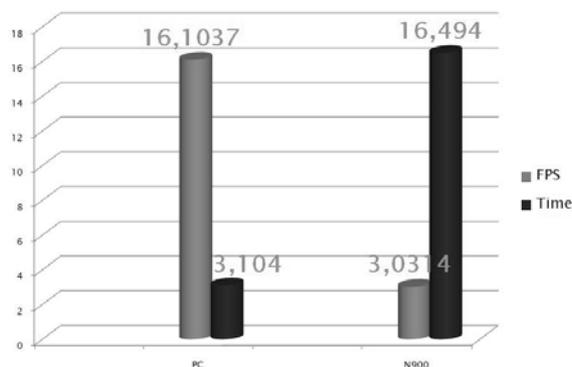


Рис. 3. Отслеживание движения

По результатам работы можно сделать вывод о том, что на мобильных устройствах возможно использование алгоритмы машинного зрения для решения некоторых задач (например, таких, как фильтрация изображения). Тем не менее, данные алгоритмы нуждаются в оптимизации. В связи с этим планируется оптимизация тестируемых алгоритмов под мобильные устройства, и дальнейшее изучение производительности алгоритмов машинного зрения.

[1] <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ НА ВЕРОЯТНОСТЬ БИТОВЫХ ОШИБОК В ЦИФРОВОМ ПРИЕМНИКЕ

В.А. Калинин

*Нижегородский госуниверситет*

При когерентном приеме сообщения, передаваемого по цифровой системе связи, для его дальнейшей обработки необходимо провести фазовую, частотную и символьную синхронизацию, то есть установить начальную фазу принятого сигнала, его частоту, а также (при передаче дискретного сигнала) необходимо восстановить точные моменты взятия выборок.

Существует достаточно много работ [1,2], посвященных влиянию алгоритма какого-либо отдельного вида синхронизации на качество принимаемого сигнала, однако практический интерес представляет совместное влияние всех видов синхронизации на вероятность возникновения битовых ошибок (bit error rate – BER) в

системе. Для получения такой оценки была построена модель цифровой пакетной системы связи. В модели использовался тип модуляции сигнала QAM-16 с кодировкой Грея, была промоделирована схема тактовой синхронизации Гарднера [1], схема фазовой и частотной подстройки Костаса для QPSK сигнала [1].

Схема тактовой синхронизации Гарднера определяет момент, когда необходимо взять отсчет, и интерполирует значение сигнала в этот момент. Для определения самого момента взятия выборки схема Гарднера использует симметричные свойства сигнала на выходе согласованного фильтра.

Пусть при поступлении на вход согласованного фильтра двух сигналов длительностью  $T$  каждый, отклик фильтра достигает своего максимума в моменты  $t=T/2$ , и  $t=3T/2$ , и спадает до нуля в момент конца одного сигнала и начала другого  $t=T$  (рис. 1). Для принятия решения

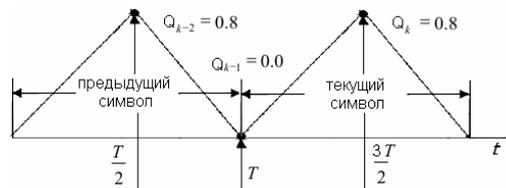


Рис. 1

о переданном символе необходимо взять отсчеты в моменты  $t=T/2$  и  $t=3T/2$ . Для определения этих  $t$  используется произведение отсчета в момент  $t=T$  и разности отчетов в моменты  $t=T/2$ , и  $t=3T/2$ . В случае комплексного сигнала таким образом обрабатываются выборки в обоих каналах, синфазном ( $I$ ) и квадратурном ( $Q$ ), по формуле [1]:

$$e_k = (I_k - I_{k-2}) I_{k-1} + (Q_k - Q_{k-2}) Q_{k-1} \quad (1)$$

где  $I_{k-2}$ ,  $Q_{k-2}$  – выборки синфазного и квадратурного каналов в момент  $t=T/2$ ;  $I_{k-1}$ ,  $Q_{k-1}$  – выборки в момент  $t=T$ ;  $I_k$ ,  $Q_k$  – выборки при  $t=3T/2$ . Сигнал  $e_k$ , определяющий моменты взятия отсчетов для принятия решения о переданном символе, поступает на интерполирующий фильтр, восстанавливающий значение сигналов в нужные моменты времени.

Схема Костаса является петлей с обратной связью и включает в себя генератор, управляемый напряжением (ГУН), и детектор, вырабатывающий управляющий сигнал в зависимости от разности фаз и частот входного сигнала и сигнала ГУН. Поступающий на блок коррекции сигнал перемножается с сигналом ГУНа, произведение входного сигнала и сигнала ГУН обрабатывается детектором. Детектор вычисляет управляющий сигнал по формуле [1]:

$$e_s = i_k \text{sign}(q_k) - q_k \text{sign}(i_k) \quad (2)$$

где  $i_k$  и  $q_k$  – синфазная и квадратурная компоненты произведения сигнала и ГУН. С помощью петлевого фильтра из этого выражения можно выделить член, пропорциональный разности фаз и частот принимаемого сигнала и гетеродина. Управляющий сигнал  $e_k$  поступает на вход ГУН, и корректирует его фазу и частоту таким образом, чтобы компенсировать сдвиг частоты и разность фаз в произведении входного сигнала и сигнала ГУН. На выходе детектора вырабатывается скорректированный сигнал.

На рис. 2 представлена теоретическая зависимость BER от отношения сигнал/шум для типа модуляции QAM-16 без учета неточности синхронизации, вычисленная по формуле [3]:

$$P_b \approx \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q \left[ \sqrt{\left( \frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \right) \frac{2E_b}{N_0}} \right] \quad (3)$$

где  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  –

гауссов интеграл ошибок,  $L$  – количество уровней амплитуды в одном измерении ( $L=4$  для QAM-16),  $E_b/N_0$  – отношение мощности сигнала к мощности шума в системе. На том же рисунке приведена зависимость BER, полученная при моделировании описанных выше алгоритмов синхронизации.

Как видно из сравнения графиков, совместная работа исследуемых алгоритмов увеличивает BER в среднем на порядок при  $E_b/N_0$  от 10 до 14 дБ. При меньших  $E_b/N_0$  наблюдается срыв кадровой синхронизации, при  $E_b/N_0 = 15$  дБ – BER менее  $10^{-6}$ , что является допустимой величиной в современных цифровых системах связи.

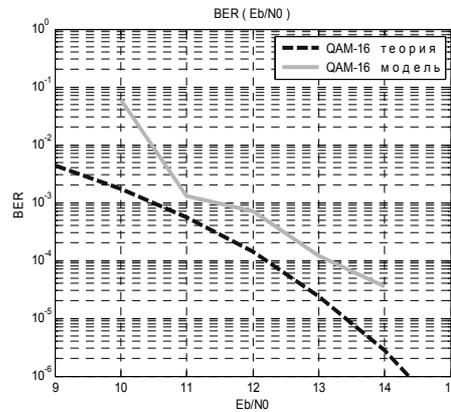


Рис. 2

- [1] Mohamed K. Nezami. RF Architectures and Digital Signal Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers. – Ph. D., K14CUA, 2003. P. 513.
- [2] Прокис Дж. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000, 800 с.
- [3] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2007.