

УДК 519.74, 681.51

## **Исследование эффективности использования адресного пространства протокола Bluetooth**

Д.А. Зайцев, М.В. Березнюк

### **Аннотация**

В настоящей работе построены модели Петри ведущего и ведомых устройств, реализующих протокол Bluetooth. На примере моделей пикосетей с различным числом ведомых устройств выполнена оценка эффективности использования адресного пространства протокола. Для построения и исследования моделей использована промышленная моделирующая система CPN Tools. Выявлена возможность пробуксовки обмена информацией при росте числа подключённых к пикосети ведомых устройств.

У даній роботі побудовано моделі Петрі ведучого та відомого пристроїв, реалізуючих протокол Bluetooth. На прикладі моделей пікомереж з різною кількістю відомих пристроїв виконано оцінку ефективності використання адресного простору протоколу. Для побудови та дослідження моделей використана промислова моделююча система CPN Tools. Виявлено можливість пробуксовки обміну інформацією при рості кількості підключених до пікомережі відомих пристроїв.

In the present work the Petri net models of master and slave devices implementing protocol Bluetooth were built. On the examples of piconets' models with various number of slave devices the evaluation of address space usage efficiency was implemented. For models' construction and investigation the enterprise-level simulation system CPN Tools was used. It was found the possibility of information exchange slipping at the growth of number of attached to piconet slave devices.

### **Введение**

На начальной стадии своего развития протокол Bluetooth [1,2] ввиду высокой стоимости реализующих его устройств имел в основном военное и специальное применение как один из основных протоколов сетей мобильных сенсорных устройств. Он использовался для сбора информации от автономно работающих датчиков, распределённых в радиусе до одного километра, и применялся для визуального наблюдения, прослушивания, радиационного

мониторинга. В [3] отмечается применение протокола Bluetooth для создания панорам возможных районов проведения военных операций.

В настоящее время в связи с удешевлением Bluetooth устройств протокол находит широкое офисное применение для создания беспроводных пикосетей. На рынке представлен широкий выбор периферийного оборудования компьютеров, поддерживающих обмен информацией по протоколу Bluetooth: принтеры, клавиатура, манипуляторы "мышь", акустические системы. Достаточно распространённой является Bluetooth гарнитура мобильных телефонов "свободные руки".

Так как построение аналитических моделей Bluetooth сетей затруднено ввиду сравнительно высокой сложности технологии, имитационное моделирование является перспективным направлением исследований. Известно применение специализированной моделирующей системы ns для исследования режимов энергосбережения Bluetooth [3]. Однако применение специализированных систем моделирования имеет ряд недостатков, основной из которых состоит в сложности интеграции моделей при исследовании гетерогенных сетей. Раскрашенные сети Петри [4,5] моделирующей системы CPN Tools [6] являются универсальной алгоритмической системой и позволяют моделировать телекоммуникационные устройства и сети [7-12]. Предложенный ранее метод измерительных фрагментов [9,10] обеспечивает измерение нетривиальных характеристик моделируемого объекта в процессе имитации динамики сети Петри.

Целью настоящей работы является построение типовых моделей ведущего и ведомого Bluetooth устройств в форме раскрашенных сетей Петри, а также оценка эффективности использования адресного пространства протокола.

### **Обзор технологии Bluetooth**

В настоящее время объёмы продаж Bluetooth оборудования значительно превышают объёмы продаж оборудования IEEE 802.11 – известного стандарта беспроводных локальных сетей WLAN (Wireless Local Area Network). Организация IEEE создала специальную группу для разработки стандарта 802.15, во многом основанного на спецификациях Bluetooth, и названного стандартом беспроводных сетей персонального использования WPAN (Wireless Personal Area Networks), также именуемых пиконет.

Разработку и сопровождение стандартов Bluetooth выполняет специальная группа интересов SIG (Special Interest Group), образованная в мае 1998 года такими фирмами, как Intel, 3COM, Ericsson, IBM, Motorola, Nokia, Toshiba. Основные спецификации протокола представлены в документах [1]. Архитектура протокола [2] изображена на Рис. 1.

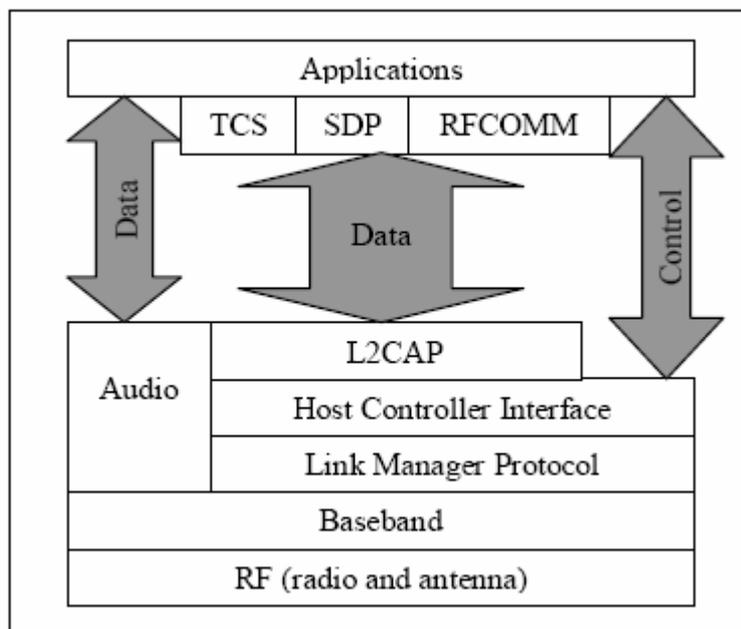


Рис. 1. Архитектура протокола Bluetooth

Интерфейс протокола с эфиром представлен уровнем радио частот RF (Radio Frequency). Номинальная мощность антенны находится в диапазоне 1-100 mW, что обеспечивает радиус действия 10-100 метров. Протокол использует прыгающие частоты в нелицензируемом диапазоне от 2.402 до 2.480 GHz. Всего предусмотрено 79 уровней рабочих частот (каналов) в указанном диапазоне. Уровень радиопередачи Baseband предусматривает случайную последовательность каналов для обеспечения передачи информации и процедуру согласования последовательности. Случайная последовательность смены каналов обеспечивает совместную работу нескольких пикосетей в одном и том же диапазоне частот. Каждая пикосеть образуется одним ведущим устройством (Master) и несколькими ведомыми устройствами (Slave). Пакет передаваемой информации составляется из нескольких слотов (1, 3 или 5); передача слота занимает 625 us, каждый из слотов может передаваться по собственному каналу. Стандартная частота смены каналов 1600 каналов в секунду, что обеспечивает скорости обмена информацией до 721 Kbits/s. Каждое устройство имеет уникальный 48 битовый адрес, совместимый с IEEE 802. Для создания согласованного шаблона смены частот используется глобальный идентификатор пикосети Global ID, который ведущее устройство сообщает всем ведомым. Диаграмма состояний устройств пикосети, предусмотренная LMP (Link Management Protocol), представлена на Рис. 2.

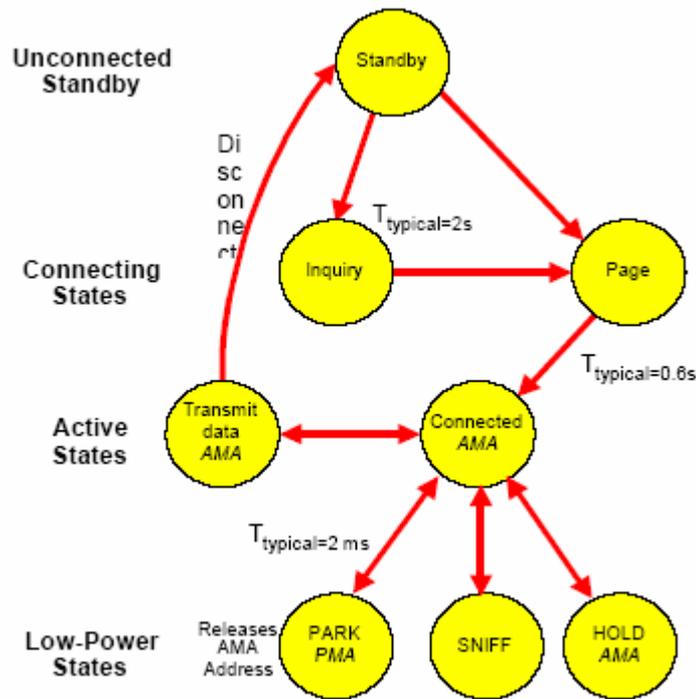


Рис. 2. Диаграмма состояний устройств пикосети

Устройство, не присоединённое к пикосети, находится в состоянии Standby. В этом состоянии устройство слушает анонсы существующих пикосетей Inquiry либо запросы на присоединение к пикосети Page. Для подключения к пикосети устройство посылает пакет Page с указанием Global ID. После подключения к пикосети устройству выделяется трёхбитовый активный адрес AMA (Active Member Address), который используется при передаче данных. Таким образом, в одной пикосети может быть до восьми одновременно активных устройств. При необходимости обмена с новыми устройствами ведущее устройство посылает пакет Park одному из ведомых устройств, принуждая его вернуть свой AMA в пул и назначает ему восьмибитовый пассивный адрес PMA (Passive Member Address). Таким образом, пиконет может содержать до 256 подключенных устройств. Предусмотрено три энергосберегающих состояния: Park, Sniff, Hold. В состоянии Hold устройство не освобождает AMA, в состоянии Sniff устройство может передавать данные через заданный интервал времени. Контроллеры Bluetooth должны поддерживать стандартный интерфейс Host Controller Interface.

В соединённом состоянии Connected в соответствии с L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) предусматривает два вида пакетов передачи данных: синхронные SCO (Synchronous Connection Oriented) и асинхронные ACL (Asynchronous Connectionless). SCO пакеты ориентированы на установление соединений и используется для передачи потоковых данных, например, голосовых; ACL пакеты применяются для передачи коротких сообщений. Для стыковки с протоколами прикладного уровня используется ряд вспомогательных

протоколов, например, протокол обнаружения сервисов SDP (Service Discovery Protocol), протокол эмуляции последовательного кабеля RFCOMM и другие.

### **Модель ведомого устройства**

Раскрашенная сеть Петри моделирующей сети CPN Tools [6] представляет собой комбинацию графа сети Петри [4] и языка программирования CPN ML [5], используемого для описания атрибутов элементов сети. Сети Петри, в которых фишка не является элементарной, а может иметь индивидуальные характеристики, традиционно называют раскрашенными. В CPN Tools фишка является объектом абстрактного типа данных. Кроме того, в качестве атрибутов переходов и дуг сети указывают функции, проверяющие либо преобразующие характеристики фишек.

Модель ведомого Bluetooth устройства представлена на Рис. 3. Существенным для понимания организации модели является описание используемых типов, переменных и функций, представленное на Рис. 4. Основным типом (colset) фишек в настоящей работе является **pkt**, моделирующий пакеты протокола, передаваемые между ведомым и ведущим устройствами. Заметим, что в модели представлены только заголовки пакетов, содержащие АМА отправителя **srcama**, АМА получателя **dstama**, тип сообщения **mtype** и для некоторых типов сообщений РМА ведомого устройства **pma**. Адреса и тип пакета моделируются целыми числами. Представлены следующие типы пакетов: выделение АМА (**mtype=1**), освобождение АМА (**mtype=2**), передача данных (**mtype=3**).

Рассмотрим организацию модели. Контактная позиция **myPMA** хранит РМА ведомого устройства. Позиция **myAMA** хранит АМА ведомого устройства; начальная маркировка этой позиции имеет значение 8, моделирующее отсутствие назначенного АМА. Контактная позиция **Air** моделирует эфир, в котором передаются пакеты. Переход **AlloAMA** посылает запрос на выделение АМА для обмена информацией. Переход **FreeAMA** посылает запрос на освобождение АМА по завершению обмена информацией. Переход **SendData** моделирует передачу пакетов данных. Заметим, что создается множество пакетов данных, количество которых задано случайной функцией **NSend()** имеющей равномерное распределение в диапазоне от 20 до 30.



---

```
colset addr=INT;
colset ptype=INT;
colset pkt = record
srcama:addr*dstama:addr*mtype:ptype*pma:addr;
var p:pkt;
var ama,pma,tpma:addr;
colset amatab=product addr*addr;
var i:INT;
colset npkt=int with 20..30;
fun NSend()=npkt.ran();
```

---

Рис. 4. Описания типов, переменных и функций

Заметим, что модель ведомого устройства содержит две контактных позиции **Air** и **myPMA**, помеченные тэгом I/O, используемые далее при компоновке моделей пикосетей.

### Модель ведущего устройства

Модель ведущего устройства изображена на Рис. 5. Ключевым элементом модели является таблица распределения АМА, представленная позицией **TabAMA**. Тип записи таблицы **amatab** сопоставляет каждому допустимому значению АМА ведомого устройства его РМА; свободные АМА помечены специальным значением РМА, равным нулю. Переход **Listen** слушает эфир и отбирает пакеты, отправляемые ведущему устройству (**#dstama p=0**). Полученные пакеты размещаются во временном буфере **InBuf**, а затем обрабатываются переходами **t1**, **t2**, **t3** в соответствии с типом полученного пакета. При получении запроса на выделение АМА (**#mtype p=1**) при наличии свободной записи ((**ama,0**)) в таблице **TabAMA** выполняется назначение адреса, что отображается в таблице ((**ama,#pma p**)). Кроме того, формируется пакет ответа ведомому устройству с указанием назначенного АМА (**{srcama=0, dstama=ama, mtype=1, pma=(#pma p)}**). При получении запроса на освобождение АМА (**#mtype p=2**) соответствующая запись в таблице **TabAMA** обнуляется и формируется пакет подтверждения освобождения адреса (**{srcama=0, dstama=ama, mtype=2, pma=tpma}**). Обработка пакетов данных (**#mtype p=1**) представлена простым подсчетом их общего количества с помощью позиции **C2**.

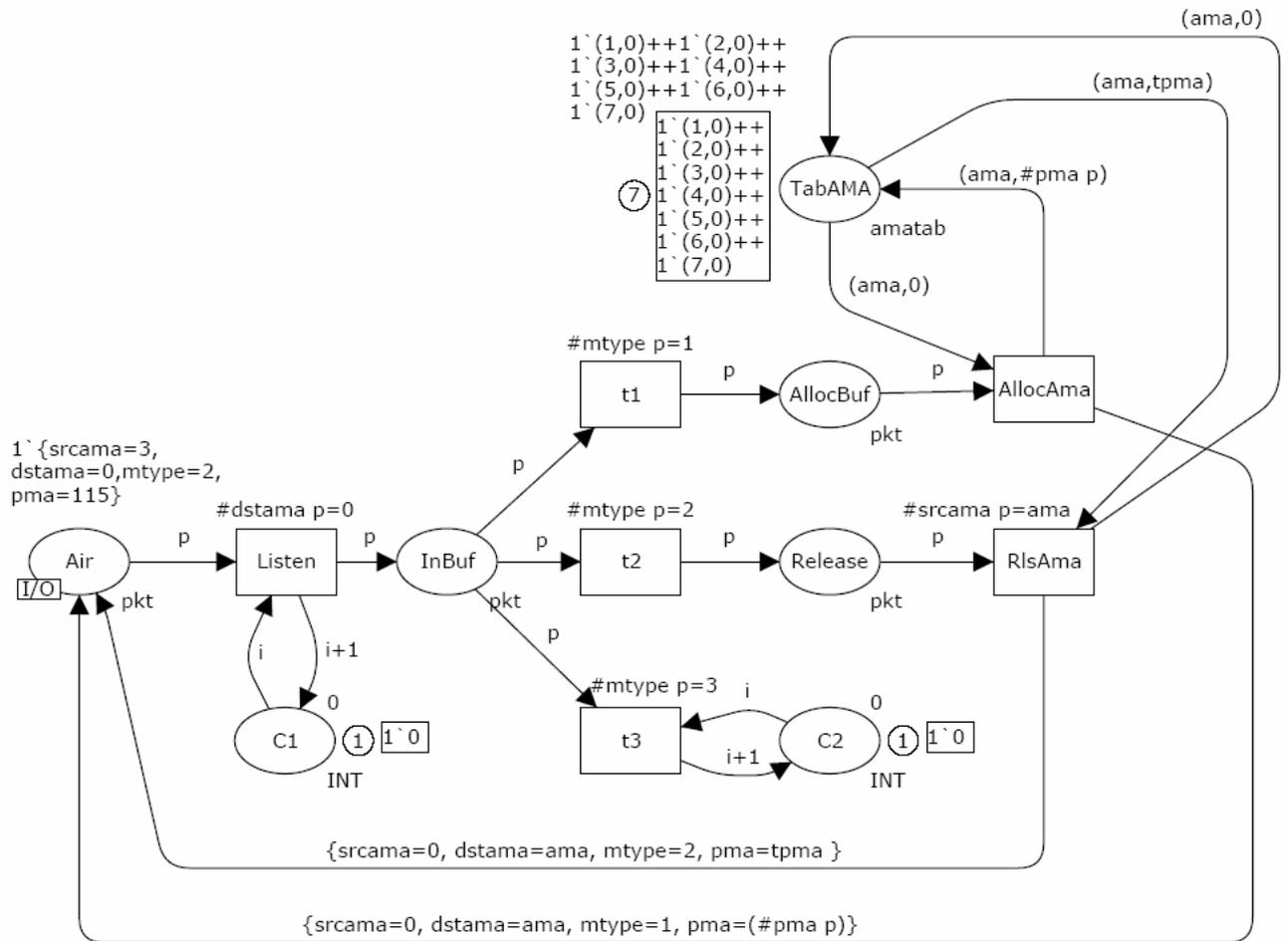


Рис. 5. Модель ведущего устройства (Master)

Заметим, пара позиций **C1** и **C2** используется для накопления статистической информации и выполняет подсчёт общего количества полученных пакетов и пакетов данных соответственно. Контактная позиция **Air** служит для обеспечения дальнейшей компоновки моделей пикосетей.

### Модели пикосетей

Предложено собирать модели пикосетей из ранее построенных подмоделей ведущего (Master) и ведомых (slave) устройств для заданного конкретного количества ведомых устройств и их адресов PMA. На Рис. 6 представлен пример модели пикосети с восьмью ведомыми устройствами. Моделирующая система CPN Tools предоставляет средства построения иерархических моделей путём подстановки переходов. Тэг с наименованием подмодели указывается возле соответствующего перехода. При подстановке перехода выполняется слияние (объединение) соответствующих контактных позиций.

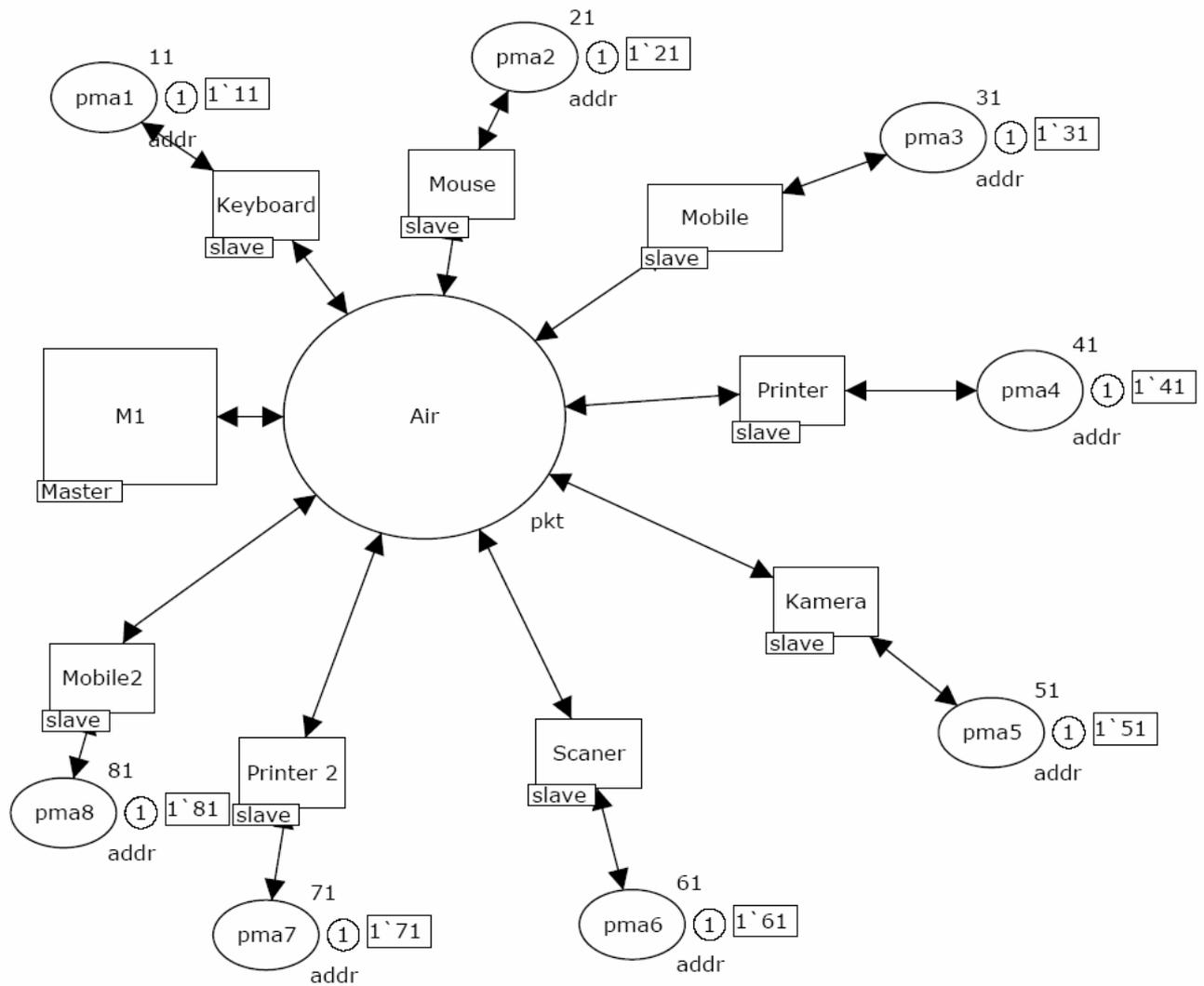


Рис. 6. Модель пикосети

Заметим, что контактная позиция **myPMA** подмоделей ведомых устройств отображается в позиции **pma1-pma8**, задающие конкретные адреса устройств пикосети. Для отладки модели использован режим пошаговой имитации динамики сети Петри моделирующей системы CPN Tools. Выполнена трассировка прохождения всех типов пакетов между парами взаимодействующих устройств. Примеры представления процессов пошаговой имитации для моделей Ethernet рассмотрены в [11,12].

### Оценка эффективности использования адресного пространства

Заметим, что, так как целью настоящей работы являлась оценка эффективности использования адресного пространства протокола Bluetooth, применён класс невременных сетей Петри. Применение временных сетей моделирующей системы CPN Tools и измерительных фрагментов для оценки времени отклика в Ethernet описано в [9,10].

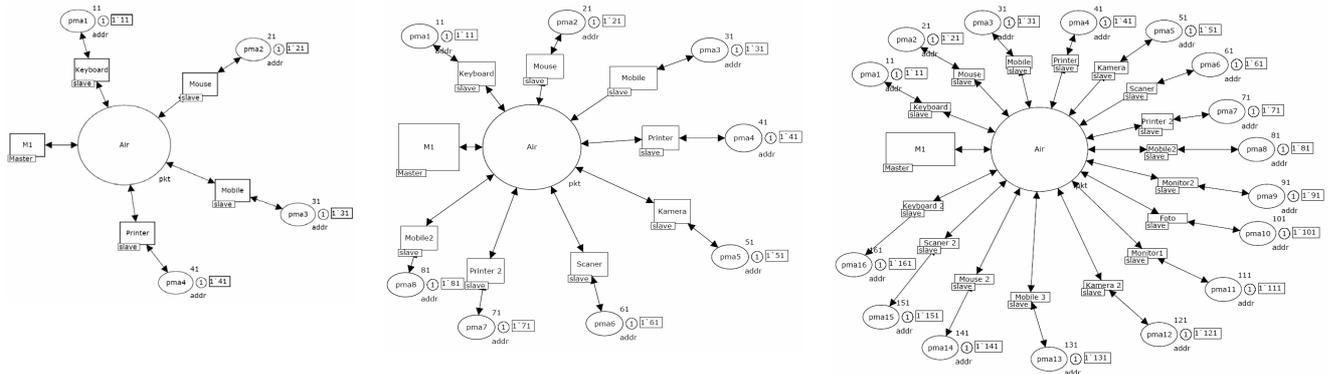


Рис. 7. Модели пикосетей с различным количеством ведомых устройств (4,8,16)

Напомним, что статистическая информация накапливается в позициях C1, C2 подмодели ведущего устройства (Master). В качестве основной характеристики эффективности использования адресного пространства оценивалась доля полезной информации, передаваемой в сети, представленная величиной  $E=C2/C1$  и названная коэффициентом эффективности обмена информацией. Для измерения среднего значения коэффициента выполнялось не менее двадцати имитационных экспериментов с моделью с количеством шагов, обеспечивающим достижение стационарного режима [9,10]. Тенденция снижения коэффициента эффективности с ростом числа ведомых устройств хорошо прослеживается на графике, представленном на Рис. 8.

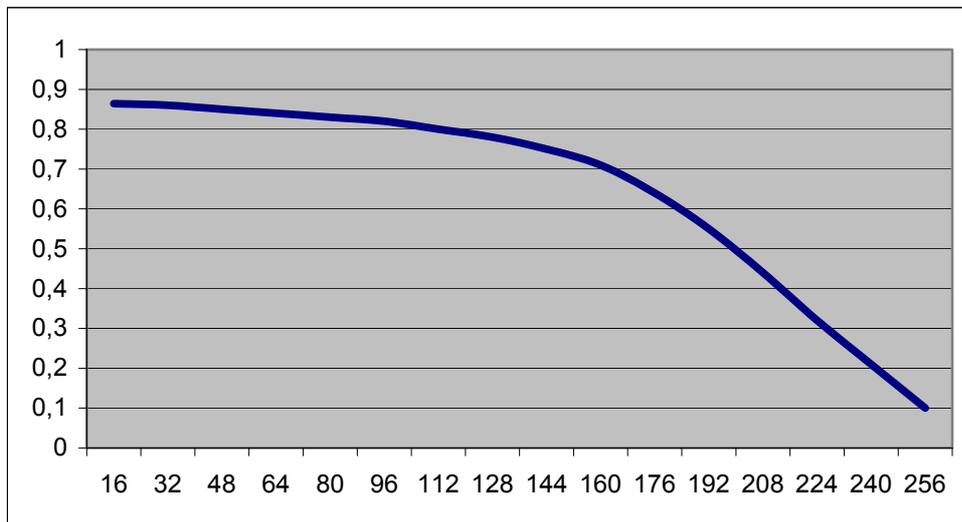


Рис. 8. График зависимости коэффициента эффективности от количества ведомых устройств

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что при росте количества подключенных устройств наблюдается общее снижение эффективности информационного обмена и практическое его блокирование при количестве ведомых

устройств более 200. Наблюдаемый эффект (по аналогии с терминологией операционных систем) назван пробуксовкой обмена информацией.

### **Заключение**

Таким образом, в настоящей работе построены типовые модели ведущего и ведомого Bluetooth устройств, предназначенные для оценки эффективности использования адресного пространства протокола. На серии моделей пикосетей для различного числа ведомых устройств выполнена оценка эффективности использования адресного пространства. Наблюдается общая тенденция снижения эффективности при росте количества ведомых устройств и пробуксовка обмена информацией при количестве ведомых устройств близком к максимальному. Общий подход к построению моделей может быть использован при исследовании иных аспектов протокола Bluetooth и других протоколов.

### **Список литературы**

1. Bluetooth Special Interest Group, Specification of the Bluetooth System. Revision 1.0b, December 1, 1999 ([www.bluetooth.com](http://www.bluetooth.com)).
2. Kardach J. Bluetooth Architecture Overview // Mobile Computing Group, Intel Corporation, 2002.
3. Zhang X., Riley G.F. "Bluetooth Simulations for Wireless Sensor Networks using GTNetS", Proceedings of 12th Annual Meeting of the IEEE / ACM International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, October 5-7, 2004, Volendam, Netherlands, pp. 375-382.
4. Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения // ТИИЭР, т. 77, №4, 1989, с. 41-85.
5. Jensen K. Colored Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use.- Vol. 1-3, Springer-Verlag, 1997.
6. Beaudouin-Lafon M., Mackay W.E., Jensen M. et al. CPN Tools: A Tool for Editing and Simulating Coloured Petri Nets. LNCS 2031: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, 2001, 574-580 (<http://www.daimi.au.dk/CPNTools>).
7. Zaitsev D.A. Switched LAN simulation by colored Petri nets. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 65, no. 3, 2004, 245-249.
8. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Моделирование коммутируемой локальной сети раскрашенными сетями Петри // Зв'язок, № 2 (46), 2004, с. 56-60.
9. Zaitsev D.A. An Evaluation of Network Response Time using a Coloured Petri Net Model of Switched LAN // Proceedings of Fifth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools, October 8-11, Aarhus, Denmark, p. 157-167.
10. Зайцев Д.А. Измерительные фрагменты в моделях Петри телекоммуникационных сетей // Зв'язок №2 (54), 2005, с. 65-71.
11. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Параметрическая модель Петри одноуровневой коммутируемой сети // Труды Одесской национальной академии связи им. А.С.Попова, № 1, 2005, с. 33-40.
12. Зайцев Д.А., Шмелёва Т.Р. Основы построения параметрических моделей Петри коммутируемых сетей // Моделирование и компьютерная графика: Материалы 1-й международной научно-технической конференции, 4-7 октября 2005, Донецк, ДонНТУ, 2005, с.207-215.