

УДК 004.728.3.057.4

А.П. Войтер

## **Media Access Control-уровень сверхширокополосных импульсных радиосетей**

Описаны особенности и организация *Media Access Control*-уровня сетей на основе импульсных сверхширокополосных сигналов, приведена классификация соответствующих протоколов таких сетей и математическая модель для оценки пропускной способности наиболее простого протокола.

The features and the organization of the *Media Access Control*-layer networks based on pulsed ultra-wideband signals are described, the classification of the corresponding protocols of such networks and the mathematical model for evaluating the throughput ability of the most simple protocol are given.

Описано особливості і організація *Media Access Control*-рівня мереж на основі імпульсних надширокополосних сигналів, подано класифікацію відповідних протоколів таких мереж та математичну модель для оцінки пропускної здатності найпростішого протоколу.

**Введение.** Сверхширокополосные импульсные радиосигналы (*Impulse Radio Ultra Wide Band – IR–UWB*) находят широкое применение при построении телекоммуникационных сетей различного назначения. Импульсная природа таких сигналов, с одной стороны, имеет ряд проблемных свойств, которые затрудняют или делают невозможным применение протоколов управления доступом к радиоканалу (*MAC – Media Access Control*) *MAC*-протоколов, используемых в узкополосных сетях, а с другой – обладает уникальными свойствами, позволяющими реализовать дополнительные полезные функции на *MAC*-уровне архитектуры *IR–UWB*-сетей. К проблемным свойствам можно отнести:

- невозможность прямого определения занятого состояния радиоканала известными способами по сигналу несущей из-за низкой спектральной плотности мощности сигналов, обусловленной малой длительностью импульсов и широким спектром излучения;
- низкая эффективность косвенного определения занятости радиоканала процедурами обмена пакетами управления из-за большой длительности синхронизирующей последовательности, многократно превышающей длительность передачи управляющих пакетов.

Уникальные свойства таковы.

- Естественная способность многоканальной передачи, обусловленная очень малой длительностью импульсов расширения спектра по отношению к длительности передачи одного бита информации, что дает возможность одновременной передачи многими абонентами. В этом отношении, в противоположность узкополосным сетям, *MAC*-уровень представляет собой множество каналов коллективного пользования, которые в общем случае не полностью ортогональны и оказывают взаимное влияние на достоверность передачи. Свойство многоканальности потенциально позволяет увеличить пропускную способность *IR–UWB*-сетей в сравнении с узкополосными сетями, и это следует учитывать при проектировании *MAC*-уровня.

- Высокая разрешающая способность в определении расстояния между абонентами, существенно превышающая возможности, предоставляемые глобальными спутниковыми системами позиционирования. Это хорошее средство для кластеризации сети и для регулирования мощности передачи в целях снижения шумов неортогональности в месте приема.

- Сильное влияние физического уровня архитектуры сети на характеристики *MAC*-уровня, например обратная зависимость скорости передачи данных и количества виртуальных моноканалов на *MAC*-уровне, т.е. чем выше

скорость передачи, тем меньше период повторения импульсов и соответственно меньше количество ортогональных позиций импульсов расширения спектра, которое возможно разместить в периоде, и наоборот.

В отличие от *MAC*-протоколов узкополосных сетей, где любые столкновения приводят к взаимному разрушению столкнувшихся пакетов, для *IR-UWB*-сетей столкновения не столь фатальны.

В *IR-UWB*-сетях существует два вида столкновений – *первичные* и *вторичные*.

*Первичные* столкновения приводят к системной интерференции, а *вторичные* – к интерференции неортогональности. Первичные столкновения происходят, когда два или более узлов одновременно передают на один и тот же узел (используя один и тот же самый код) и ее последствия эквивалентны столкновениям в узкополосных сетях.

*Вторичные* столкновения происходят, когда узлы используют различные коды, но из-за их неполной ортогональности, обусловленной, прежде всего асинхронным характером работы сети, возникают шумы такого уровня, при котором невозможен прием в точке назначения пакета. Всегда желательно устранить первичные столкновения, тогда как вторичные неизбежны и необходимо лишь ограничивать уровень, порождаемой ими интерференции допустимым значением.

Таким образом, при организации *MAC*-уровня *IR-UWB*-сетей необходимо расширить набор его функций, добавив дополнительно функцию назначения кодов и функцию регулирования уровня шумов многопользовательской интерференции (*Multi-User Interference – MUI*), выполняемой путем оптимизации использования мощности и/или скорости передачи в сети с целью обеспечения заданной вероятности успешного приема пакетов.

### **Организация *MAC*-уровня**

В *IR-UWB*-сетях благодаря естественному свойству сверхширокополосных сигналов обеспечиваются множественные каналы коммуникации. Первоначально одновременные передачи в сетях были созданы для кодового раз-

деления (*DS CDMA – Direct Sequence Code Division Multiple Access*). Основные положения этого подхода применимы и для *IR-UWB*.

В сетях с кодовым разделением одновременные передачи возможны при использовании различных кодов для различных передач. Как следствие, одной из дополнительных функций *MAC*-уровня должна быть функция назначения кодов по определенной стратегии. Существует две таких стратегии:

- стратегия основана на закреплении кода за приемником, где каждый приемник  $j$  имеет собственный код  $C_j$  и терминал  $i$ , желающий передать терминалу  $j$ , должен использовать код  $C_j$ ;

- стратегия основана на закреплении кода за передатчиком, где каждый передатчик  $i$  имеет собственный код  $C_i$  и использует этот код во всех передачах данных.

Первая стратегия менее сложна, так как приемник должен синхронизироваться только на один код. С другой стороны, множество передатчиков, использующих один и тот же код для одновременной передачи на один приемник, неизбежно столкнутся. С этой точки зрения вторая стратегия более целесообразна, так как несколько передач могут быть направлены одновременно к одному и тому же приемнику с различными кодами. В таком сценарии одна из этих передач будет воспринята приемником как полезный сигнал, в то время как другие внесут шум многопользовательской интерференции. Однако следует отметить, что в этом случае приемник должен быть настроен на необходимый код. Поэтому этот подход нуждается в определенной процедуре кодового обмена до начала передачи пакета.

Назначение кода на каждый терминал может быть или статическим, или динамическим. Например, решение, предложенное в [1], гарантирует, что один и тот же код никогда не назначается на терминалы, удаленные менее чем на три скачка коммутации друг от друга, избегая таким образом столкновений.

Пример стратегии с закреплением кода за передатчиком описан в [2], где предложены два способа информирования приемника о пред-

стоящей передаче: использование общего кода или кода приемника.

По природе беспроводной среды достижимая в ней скорость передачи строго зависит от способности уменьшения эффектов влияния каждой радиопередачи на условия приема в соседних приемниках. Для этого осуществляется регулирование мощности передачи с целью оптимизации излучаемых уровней мощности для достижения трех положительных эффектов [3]:

- минимизации потребляемой мощности для увеличения времени автономной работы абонентов без замены элементов питания;
- сокращения интерференции;
- адаптации излучаемой мощности для учета подвижности абонентов и модификации топологии сети.

В последнее десятилетие регулирование мощности привлекло внимание специалистов в связи с появлением сотовых сетей связи третьего поколения, основанных на кодовом разделении (CDMA), так как это смягчает отрицательное влияние на достоверность приема, обусловленное разной удаленностью передатчиков от приемника (проблема разной дальности). Централизованная структура сотовых сетей связи упрощает решение этой проблемы, поскольку присутствие базовой станции дает возможность реализации эффективных алгоритмов регулирования мощности. Проблема намного сложнее в децентрализованной архитектуре сети, в которой несколько независимых звеньев могут работать одновременно без центрального диспетчера. Следовательно, контроль за мощностью должен быть ключевой функцией распределенных протоколов MAC, так как он позволяет существенно увеличить пропускную способность сети [4]. В работе [3] предложен распределенный протокол регулирования мощности для децентрализованной сети совместно с функцией управления входным трафиком, связанной с мощностью.

Регулирование мощности существенно для сетей IR-UWB по крайней мере по двум причинам:

- сети IR-UWB подвержены влиянию проблемы разной дальности;

- учитывая ограничения на уровни мощности в сетях IR-UWB, необходимо эффективно ее использовать. Известны работы, например [5], где доказано, что для минимизации MUI необходимо адаптировать скорость передачи при постоянной мощности.

### Классификация MAC-протоколов

Функции MAC-уровня реализуются в MAC-протоколах. Для узкополосных сетей существуют различные варианты классификации MAC-протоколов [6]. Несмотря на общность выполняемых задач, MAC-протоколы для сетей на основе IR-UWB, как отмечалось ранее, имеют специфические особенности, требующие и отдельного подхода в их классификации. Один из таких подходов представлен на рис. 1, где приведена классификация MAC-протоколов IR-UWB-сетей по пяти основным признакам, достаточно полно отражающим нынешнее состояние организации множественного доступа в сверхширокополосных системах связи общего назначения:

Организация радиоканала отражает его структурную характеристику, которая может быть:

- однополосной, когда и процедуры MAC-протокола и собственно передача данных осуществляются в единой полосе частот [7];



Рис. 1. Классификация MAC-протоколов для IUWB-сетей; CCA – Clear Channel Assessment (свободное состояние радиоканала)

- многополосной, когда для процедур управления MAC-протокола выделяется отдельная полоса частот, а передача данных осуществляется в одной или нескольких отдельных полосах [8].

*Структура сети* может быть однородной, когда все абоненты функционально идентичны, и кластерной, когда в сети выделяются главные узлы и подчиненные им простые узлы. Главные узлы и окружающие их простые узлы образуют кластеры сети с определенными автономными функциями MAC-уровня и процедурами межкластерного взаимодействия.

*Стратегия доступа* характеризует степень учета коллективных интересов абонентов при конкурентном доступе к радиоканалу. Когда при принятии решения о начале передачи абоненты не принимают во внимание возможные текущие передачи или намерения передачи других абонентов, то такая стратегия называется *случайной*. В противном случае речь идет об управляемом доступе, который может быть реализован выполнением процедур контроля свободного состояния радиоканала (*Clear Channel Assessment – CCA*) в виде прямого обнаружения текущей передачи в радиоканале [9], либо косвенного – через процедуры установления соединения или контроля наличия передачи в радиоканале, но не по уровню мощности, как это происходит в узкополосных сетях, а по наличию спектральных компонентов последовательности импульсов *I-UWB* [11]. Управление доступом может быть также осуществлено с использованием специального сигнала *Занято*, который принимающий абонент передает в течение приема адресованного ему пакета [10].

*Гарантия качества* предусматривает наличие в MAC-протоколе специальных процедур, обеспечивающих приоритетный доступ к радиоканалу определенных абонентов либо определенного вида трафика с целью обеспечения необходимых параметров *QoS* [9].

*Направленность процедур* указывает, какому из видов интерференции противостоит MAC-протокол. Противостояние системной интерференции выполняется соответствующим распределением кодов расширения сигнала между

абонентами, которое может быть выполнено случайным назначением кодов [12, 13], когда их число меньше количества абонентов, либо фиксированным закреплением кодов за абонентами по ориентированной на приемник или на передатчик схемам [14, 15]. Противостояние интерференции неортогональности направлено на снижение уровня помех в каждой точке приема (повышение вероятности успешного приема) и осуществляется адаптацией мощности передачи [16], скорости передачи [5] либо согласованной совместной адаптации этих двух параметров [9].

### **Оценка пропускной способности**

При конфликте в узкополосных сетях повреждаются все конфликтующие пакеты и за время конфликта пропускная способность сети равна нулю. Рассмотрим *IR-UWB*-сеть с закреплением кодов за приемником и игнорированием влияния интерференции неортогональности. В такой сети конфликты возможны только между пакетами, адресованными одному и тому же абоненту, другие пакеты благодаря свойствам *IR-UWB*-сигналов принимаются абонентами параллельно и бесконфликтно. Пусть в сети с  $K$  абонентов за интервал времени, равный времени передачи пакета при доступе по синхронному протоколу *ALOHA* [6], с вероятностью  $P(m)$  возникает  $m$  пакетов для передачи. Возможны две крайние ситуации. Первая, когда все пакеты адресованы одному и тому же абоненту. В этом случае пакеты при передаче будут повреждены, и пропускная способность сети за этот интервал времени будет равной нулю, как и при конфликте в узкополосных сетях. Вторая ситуация, когда все  $m$  пакетов адресованы различным абонентам. Все пакеты будут приняты бесконфликтно, и абсолютная пропускная способность сети за рассматриваемый интервал времени будет равна  $m$  пакетов. Для относительной оценки пропускной способности независимо от количества абонентов в сети введем понятие нормированной пропускной способности  $C = \frac{C_a}{K}$ , где  $C_a$  – абсолютная пропускная способность сети при  $m$  одно-

временных передачах. Очевидно, что  $C_a = 1$  возможно лишь в гипотетическом случае, когда все пакеты адресованы различным абонентам. Предположим, что пакеты адресуются абонентам с одинаковой вероятностью. Определим вероятность  $P_1$  того, что кому-либо из  $K$  абонентов при заданном  $m$  будет адресован только один пакет. Из теоремы о повторении опытов известно, что вероятность того, что некоторое событие в  $m$  опытах произойдет ровно  $i$  раз, определяется уравнением:

$$P_i = C_m^i p^i (1-p)^{m-i}. \text{ Отсюда } P_1 = \frac{m}{K} \left( \frac{K-1}{K} \right)^{m-1}.$$

Таким образом, в среднем за одну передачу будет успешно параллельно передано количество пакетов, определяемое уравнением

$$M = KP(1) = m \left( \frac{K-1}{K} \right)^{m-1},$$

а в нормированном по количеству абонентов виде, соответственно  $M_n = \frac{m}{K} \left( \frac{K-1}{K} \right)^{m-1}$ .

При пуассоновской модели поступления пакетов вероятность того, что за нормированное время передачи пакета, которым синхронизируется протокол *ALOHA*, поступит ровно  $m$  пакетов, определяется известным уравнением:

$$P(m) = \frac{G^m e^{-G}}{m!}, \text{ где } G - \text{нормированная по дли-}$$

тельности передачи пакета интенсивность поступления пакетов [6]. Тогда с учетом того, что  $m \leq K$  (абонент не может передавать более одного пакета за один раз) в общем случае можно записать:

$$C = \sum_{m=1}^K P(m) M_n = \sum_{m=1}^K \frac{G^m e^{-G}}{K(m-1)!} \left( \frac{K-1}{K} \right)^{m-1}.$$

На рис. 2,а показана зависимость нормированной пропускной способности сети  $C$  ( $G$ ) для трех значений количества абонентов.

Для абсолютной оценки пропускной способности необходимо воспользоваться уравнением:

$$C_a = \sum_{m=1}^K P(m) M = \sum_{m=1}^K \frac{G^m e^{-G}}{(m-1)!} \left( \frac{K-1}{K} \right)^{m-1}.$$

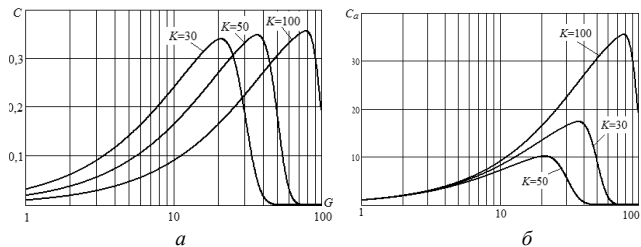


Рис. 2. Пропускная способность сети

На рис. 2,б показана зависимость абсолютной пропускной способности  $C_a$  ( $G$ ) для трех значений количества абонентов в сети. В данном случае значение  $C_a > 1$  вследствие параллельных передач, обусловленных свойствами *IR-UWB*-сигналов.

**Заключение.** Уникальные свойства *IR-UWB*-сигналов требуют специального подхода к проектированию *MAC*-уровня, в котором должны быть учтены невозможность определения известными методами занятого состояния радиоканала и естественная способность сигналов обеспечения параллельной во времени передачи определенным количеством абонентов в общем радиоканале.

Количество одновременных передач в радиоканале ограничена системной интерференцией, а также уровнем шумов многопользовательской интерференции – *MUI*. Для устранения системной интерференции на *MAC*-уровне предусмотрены процедуры динамического назначения кодов расширения в условиях превышения количества абонентов в сети над количеством доступных ортогональных кодов. Для снижения *MUI* используются механизмы ее локального измерения и децентрализованного ограничения на уровне, обеспечивающем заданную вероятность успешной передачи. Использование специального канала управления и процедур резервирования позволяет оценивать параметры радиоканала между корреспондирующими абонентами, отслеживать количество активных абонентов по соседству, сообщать принимающим терминалом соседним с ним узлам значение дополнительной шумовой мощности, которую каждый из них может добавить к суммарной *MUI*, не разрушая текущий прием данных этого терминала, что в итоге повышает пропускную способность сети.

Согласованная оптимизация мощности и скорости передачи для активных соединений позволяет обеспечить требуемое качество обслуживания на MAC-уровне для заданных видов трафика, а также обеспечить равноправный доступ абонентов, находящихся на разном удалении от точки приема.

Существует возможность определения свободного состояния радиоканала, основанная не на измерении энергии сигнала, а на анализе спектральных компонентов последовательности импульсов IR-UWB. Реализация этой возможности обеспечивает минимизацию использования энергии при передаче и повышения пропускной способности радиоканала.

Эффективным средством повышения пропускной способности IR-UWB-сетей, как и в узкополосных сетях, служит локализация конфликтов путем разделения канала передачи данных на ряд подканалов в сочетании с каналом управления.

Предложенная математическая модель позволяет количественно оценить пропускную способность IR-UWB-сети для простого протокола неконтролируемого доступа с закреплением кодов за приемником.

1. *Garcia-Luna-Aceves J.J., Raju J.* Distributed Assignment of codes for multihop packet-radio networks // Proc. of IEEE MILCOM 97, 2–5 Nov. 1997. – 1. – P. 450–454.
2. *Sousa E.S., Silvester J.A.* Spreading Code protocols for Distributed Spread-Spectrum Packet Radio Networks // IEEE Trans. Commun. –1988. – COM – 36. – P. 272–281.
3. *Bambos N.* Toward power-sensitive network architectures in wireless communications: Concepts, issues, and design aspects // IEEE Pers. Commun. – June 1998. – 5. – P. 50–59.
4. *Gupta P., Kumar P.R.* The capacity of wireless networks // IEEE Transactions on Information Theory. – March 2000. – 46, N 2. – P. 388–404.
5. *Le Boudec J-Y, Merz R., Radunovic B., Widmer J.* DCC-MAC: A Decentralized MAC Protocol for 802.15.4a-like UWB Mobile Ad-Hoc Networks Based

on Dynamic Channel Coding // Proc. First Int. Conf. on Broadband Networks, Oct. 25–29, 2004.

6. *Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П.* Сотовые радиосети с коммутацией пакетов. – К.: Наук. думка, 2003. – 266 с.
7. *A Multiband MAC Protocol for Impulse-based UWB Ad Hoc Networks.* / I. Broustis, S. Krishnamurthy, M. Faloutsos et al. // IEEE Transactions on Mobile Comp. – 2007. – 6, Issue 4. – P. 351–366.
8. *El-Fishawy N., Shokair M., Saad W.* A novel MAC protocol for high rate UWB network // Ubiquitous Comp. and Comm. J. (UbiCC). – 2008. – 3, N 1. – P. 40–45.
9. *Jurdak R., Baldi P., Lopes C.V.* U-MAC: a proactive and adaptive UWB medium access control protocol // Wireless Comm. and Mobile Comp. –2005. – N 5. – P. 551–566.
10. *Wu C., Li V.* Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks // Proc. of the ACM Workshop on Frontiers in Comp. Comm. Technology, 11–13 Aug. 1987. – P. 336–342.
11. *August N.J.* Medium Access Control in Impulse-Based Ultra Wideband Ad Hoc and Sensor Networks // Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electr. Engin. – 2005. – Blacksburg, VA.
12. *Hung K.W., Yum T.S.* Efficient Spreading Code Assignment Algorithm for Packet Radio Networks // Electr. Lett. – Nov. 1992. – 28, N 23. –P. 2193–2195.
13. *Nertossi A.A., Bonuccelli M.A.* Code Assignment for Hidden Terminal Interference Avoidance in Multihop Packet Radio Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. – Aug. 1995. – 3, N 4. – P. 441–449.
14. *Hu L.* Distributed Code Assignment for CDMA Packet Radio Networks // IEEE/ACM Transactions on Networking. – Dec. 1993. –1, N 6. – P. 668–677.
15. *A Distributed Code Assignment Algorithm with High Code Reusability for CDMA-Based Ad Hoc Networks* / Chang Wu Yu, Tung-Kuang Wu, Rei-Heng Cheng et al. // Wireless Algorithms, Systems, and Applications Lecture Notes in Comp. Sci. – 2006. –4138. – P. 1428–1433.
16. *Muqattash A., Krunz M.* CDMA-based MAC protocol for wireless ad hoc networks // Proc. of the 4th ACM int. symp. on Mobile ad hoc networking & comp. – 2003. – P. 153–164.

Поступила 12.03.2014

Тел. для справок: +38 050 412-6890, 044 525-1032 (Киев)

E-mail: [voiter@kinr.kiev.ua](mailto:voiter@kinr.kiev.ua)

© А.П. Войтер, 2014