

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ ТЕХНОЛОГИЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ*

Дубинина М.Г.

Статья посвящена анализу основных тенденций развития, области применения и показателей распространения технологий беспроводной связи (в том числе Wi-Fi и WiMAX). Разработаны модели диффузии беспроводных технологий на основе трех типов моделей: эконометрических, моделей временных рядов и S-образных кривых.

DOI: 10.20537/mce2021econ10

Введение. Технологии беспроводной связи определяют методы передачи данных и голосовых сообщений без прямого физического соединения между двумя или более устройствами с помощью радиоволн, инфракрасного, оптического или лазерного излучения. Они играют ключевую роль в современных системах связи в качестве одного из важных средств передачи данных на другие устройства (например, на беспилотные транспортные средства, дроны, медицинские устройства, промышленные роботы и т.д.). Применение беспроводных технологий в новых или существующих промышленных системах для мониторинга и управления оборудованием и процессами исключает использование дорогостоящих кабелей и обеспечивают гибкость конфигурации оборудования.

Классификация технологий беспроводной связи. По дальности действия беспроводные технологии могут быть классифицированы следующим образом: персональные (Wireless Personal Area Network, WPAN), локальные (Wireless Local Area Network, WLAN), городские (Wireless Metropolitan-Area Network, WMAN) и глобальные (Wireless Wide Area Network, WWAN) [1].

Сети WPAN и WLAN относятся к сетям малого радиуса действия, они обеспечивают связь между устройствами в пределах ограниченной области, и их использование не требует лицензирования. Технологиями

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 20-010-00065А

WPAN являются технологии IrDA, Bluetooth, ZigBee и Ultra Wide Band (UWB), WLAN — стандарты технологии Wi-Fi.

В сетях дальнего действия подключение обычно обеспечивается компаниями, которые продают беспроводное подключение как услугу. Сети дальнего радиуса действия (WMAN и WWAN) охватывают большие территории для обеспечения покрытия их беспроводной сетью. К ним относятся технологии WiMAX, поколения технологий сотовой связи, спутниковые сети.

Быстрыми темпами развиваются технологии мобильной связи [2]. Расширяется область применения и других видов беспроводной связи. Так, решения для «умного дома» в настоящее время основаны на технологиях ZigBee, Z-wave, EnOcean, Wi-Fi и Bluetooth Smart. SigFox и LoRa и являются наиболее широко используемыми технологиями LPWAN для промышленных приложений Интернета вещей в нелицензируемом спектре, а NB — IoT и LTE M — в лицензированном спектре.

Рынок беспроводной связи. По оценкам компании Markets and Markets [3], мировой рынок беспроводной связи в 2020 г. оценивался в 69 млрд долл., по прогнозу, к 2025 г. он достигнет 141.1 млрд долл. Основными факторами, способствующими росту беспроводной связи, являются развитие интеллектуальной инфраструктуры и рост внедрения интернета вещей, значительное увеличение степени проникновения интернета, особенно в условиях пандемии коронавируса (удаленная работа и дистанционное обучение).

При этом самыми востребованными оказываются технологии мобильной связи. Доля населения, охваченного мобильной связью (по крайней мере технологии 3G) в мире, выросла с 78.3% в 2015 г. до 92.8% в 2019 г., а сетью LTE/WiMAX — с 43.4% до 83.4% за тот же период [4]. Рынок интернета вещей (IoT) в 2019 г. составлял около 12 миллиардов устройств [5].

Особое внимание в настоящее время уделяется поколению 5G. Ожидается, что распространение этой технологии может ускорить восстановление мировой экономики после пандемии коронавируса в ближайшее десятилетие. Количество подключений к сети 5G на конец 2020 г. составляло около 401 млн человек (в 2019 г. — 5.2 млн человек). В целом, развертывание сетей 5G растет гораздо быстрее, чем любое другое предыдущее поколение технологий мобильной связи [6].

Распространение смартфонов в странах с развивающейся экономикой стимулирует рост рынка подключенных устройств на основе технологии

Wi-Fi. На долю сегмента Wi-Fi в 2019 г. приходилась почти четверть мирового рынка технологий беспроводной связи. По прогнозу ABI Research предполагается, что количество умных домашних устройств с поддержкой Wi-Fi вырастет с 5% в 2018 г. до почти 16% к 2024 г., а Bluetooth — с 4% до 13%, соответственно, за счет интерфейса голосового управления, умного освещения, сенсорных и других приложений [7].

В мире наблюдается тенденция к общедоступности этой технологии. Одна точка доступа в США, например, приходится на каждые 2 тыс. человек, в Южной Африке — на 3.5 тыс. человек, в Нигерии — на 13.8 тыс. человек, в Индии — на 37.5 тыс. человек. Либерализация лицензирования сетей Wi-Fi в Китае в 2006 г. привела к значительному росту точек доступа (на 2018 г. их число составило более 6.1 млн) [8]. В России в 2019 г. было 166 тыс. точек доступа Wi-Fi [9], в конце 2020 г. только в Москве таких точек было более 36 тыс. единиц [10].

Совершенствование технологий беспроводной связи (ZigBee, BLE, Z-Wave, EnOcean), позволяют быстро разворачивать беспроводные датчики в умных домах и офисах, они используются также в нескольких отраслях промышленности и лабораториях. Однако высокое энергопотребление беспроводных датчиков, терминалов и подключенных устройств, а также отсутствие единых стандартов связи сдерживают рынок беспроводных подключений. В то же время использование беспроводных технологий сопровождается увеличением рисков и угроз безопасности и конфиденциальности данных, что также сдерживает рост этого рынка [11, 12].

Инвестиции в беспроводные технологии. Разворачивание новых сетей или модернизация беспроводных технологий требует значительных первоначальных капиталовложений, которые затем могут амортизироваться в течение длительного периода времени. Так, за последние несколько лет операторы сотовой связи США инвестировали значительные суммы как в спектры частот, так и в оборудование сетей, что позволило им достичь высоких уровней покрытия сетью 4G. За период 2001–2019 гг. накопленные капитальные вложения отрасли беспроводной связи в США выросли более чем в 5 раз (с 105 млрд долл. в 2001 г. до 571 млрд долл. в 2019 г.), а количество подписчиков — почти в 3.5 раза (с 128.4 до 442.5 млн человек, соответственно). За 2010–2019 гг. мобильный трафик вырос почти в 100 раз (с 0.388 трлн Мб в 2010 г. до 37.06 трлн Мб в 2019 г.) [13].

Инвестиции в беспроводную связь позволили провайдерам США справиться с беспрецедентным всплеском использования мобильной связи из-за COVID-19. Согласно данным Ookla Speedtest, за первые

8 недель после введения карантина во многих странах снизилась средняя скорость загрузки данных (в Китае — на 23.5%, в Италии — на 14.5%, в Испании — на 6.9%, во Франции — на 6%, в России — на 5.1%), при этом в США скорость, наоборот, увеличилась на 4.3% [13].

Согласно отчету Rescon Analytics и СТИА, ассоциации индустрии беспроводной связи, почти 10% роста ВВП США с 2011 по 2019 г. произошло за счет роста индустрии беспроводной связи США [14].

Моделирование распространения технологий беспроводной связи. В данной статье построены модели распространения различных технологий беспроводной связи на основе трех типов моделей: эконометрических, моделей временных рядов и S-образных кривых.

Для моделирования распространения беспроводных технологий в России по данным Росстата о числе активных абонентов подвижной радиотелефонной связи, использующих услуги доступа к сети Интернет [15], был рассчитан показатель доли таких пользователей в общей численности населения России. На основе квартальных данных (3 кв. 2011 – 3 кв. 2020 гг.) построена модель временного ряда с учетом сезонности и получен прогноз доли активных пользователей подвижной радиотелефонной связи, использующих услуги доступа к сети Интернет на период до 4 квартала 2021 г.

Прогнозирование осуществлялось на основе моделирования сезонных колебаний и полиномиального тренда вида:

$$Y(t) = 0.599 + 0.005 \cdot T + 0.0002 \cdot T^2, \quad R^2 = 0.99,$$

(6.1.4) (4.7) (6.0)

где T — номер квартала ($T=1$ для 3 кв. 2011 г.), в скобках здесь и далее — t -статистики.

Согласно полученному прогнозу, доля активных абонентов подвижной радиотелефонной связи, использующих услуги доступа к сети Интернет, в общей численности населения России, составит в 1 кв. 2021 г. 1.05. Средняя абсолютная погрешность — 2.28%.

Этот прогноз оказался выше прогноза, построенного по данным, не включающим показатели 2020 г. (при прогнозировании без учета данных 2020 г. — 1.03), что может служить свидетельством повышения спроса на беспроводную связь в условиях пандемии коронавируса (см. также [16]).

Моделирование распространения технологии WiMAX, мобильной широкополосной альтернативы Wi-Fi и другим мобильным сетям (в ос-

новном LTE) для обеспечения высокоскоростного Интернета в удаленных районах по низкой стоимости внедрения, было проведено по данным компании UQ Communications о количестве пользователей технологии в Японии за два периода времени: с 3 кв. 2009 г. по 3 кв. 2013 г. и с 1 кв. 2014 г. по 2 кв. 2020 г. Для каждого периода были построены логистическая модель вида:

$$y = \frac{L}{(1 + be^{-kt})} \quad (1)$$

и модель Гомпертца

$$y = Le^{-be^{-kt}} \quad (2)$$

где y — количество подписчиков технологии WiMAX, млн человек, t — номер квартала ($t=1$ соответствует 3 кв. 2009 г.). Начальный период распространения технологии более точно описывается логистической кривой по сравнению с моделью Гомпертца, более поздние данные — моделью Гомпертца (табл.1).

Таблица 1. Оценка параметров моделей (1) и (2) (по данным [17]).

Модель	Параметры	3 кв. 2009 – 3 кв. 2013 г.	t-статистика	1 кв. 2014 – 2 кв. 2020 г.	t-статистика
Логистическая кривая	L	7.6	41.2	34.9	96.5
	b	139.5	10.4	422.1	4.8
	k	0.4	34.3	0.2	27.1
	R ²	0.9995		0.998	
	Функция потерь	0.07		10.2	
Модель Гомпертца	L	9.9	24.1	36.4	163.0
	b	13.1	6.3	42.7	14.5
	k	11.8	12.9	0.2	52.6
	R ²	0.999		0.9995	
	Функция потерь	0.17		2.0	

Эконометрическая модель распространения технологии беспроводной связи (в том числе Wi-Fi) была построена на основе панельных данных по 26 европейским странам за период 2012–2018 гг. Показателем распространения служила доля пользователей, использовавших беспроводные технологии для подключения портативных устройств к Интернету, в общей численности населения страны i в год t . Построены две модели:

$$Y(t) = -0.24 + 0.057 \cdot X_1(t) + 0.001 \cdot X_2(t) + 1.4 \cdot X_3(t), \quad R^2 = 0.82, \\ (-2.9) \quad (2.9) \quad (2.4) \quad (5.1)$$

$$Y(t) = -10.2 + 0.69 \cdot X_4(t) + 0.012 \cdot X_5(t) + 0.005 \cdot t, \quad R^2 = 0.93, \\ (-2.2) \quad (10.3) \quad (2.2) \quad (2.2)$$

где $Y(t)$ — доля пользователей, использовавших беспроводные технологии для подключения портативного устройства к Интернету, в общей численности населения страны в год t , $X_1(t)$ — инвестиции в телекоммуникационную инфраструктуру страны в год t , млрд долл., $X_2(t)$ — количество защищенных интернет-серверов на 1 тыс. человек страны в год t , $X_3(t)$ — доля пользователей широкополосного доступа в интернет в общей численности населения страны в год t , $X_4(t)$ — доля лиц, использующих ноутбуки, планшеты и др. для выхода в интернет вне дома или работы, в общей численности населения страны в год t ; $X_5(t)$ — доля абонентов встроенной мобильной связи в общей численности населения в стране в год t . Обе модели выявили положительную корреляцию между рассматриваемыми показателями.

Эконометрическая модель зависимости индекса роста количества подписчиков беспроводной связи США (по данным двух крупнейших компаний AT&T и Verizon) от индекса роста капитальных вложений в беспроводную связь и индекса роста количества патентов, полученных в США и найденных в базе данных WIPO по поиску «wireless technology», была построена по данным 2001–2018 гг. Индекс роста каждого показателя рассчитан относительно 2001 г. (2001 г. = 100%). Получена модель вида:

$$Y(t) = 75.8 + 0.27 \cdot X_1(t) + 0.06 \cdot X_2(t), \quad R^2 = 0.99, \\ (6.4) \quad (5.9) \quad (10.4)$$

где $Y(t)$ — индекс роста количества подписчиков беспроводной связи в США в год t ; $X_1(t)$ — индекс роста капитальных вложений в беспроводную связь в год t , $X_2(t)$ — индекс роста количества патентов, найденных в базе данных WIPO по поиску «wireless technology» в год t .

Закключение. Пандемия коронавируса привела к повышенному спросу на беспроводные технологии доступа в интернет, прогнозы распространения этих технологий с учетом данных 2020 г. дают более высокие показатели, чем без учета этих данных.

По панельным данным для 26 стран ЕС за период 2012–2018 гг. выявлена положительная корреляция между распространением беспроводных технологий и подключениями интернета вещей, количеством защищенных интернет-серверов на 1 тыс. человек, распространением фиксированного широкополосного доступа в интернет, инвестициями в телекоммуникационную инфраструктуру.

Распространение некоторых технологий беспроводной связи может быть описана S-образной кривой, причем на начальной стадии наилучшее приближение дает логистическая кривая, на более поздних — модель Гомперца.

На примере данных США выявлена положительная корреляция между распространением беспроводных технологий и накопленными капитальными затратами на них, а также количеством патентов, найденных в базе данных WIPO, по тэгу «wireless technology».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sharma K., Dhir N.* A study of wireless networks: WLANs, WPANs, WMANs, and WWANs with comparison // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*. Vol. 5 (6). 2014. Pp. 7810-7813.
2. *Дубинина М.Г.* Моделирование диффузии поколений технологий мобильной связи // *Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 27.* – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2020. с. 95–103. DOI: 10.20537/mce2020econ09.
3. Markets and Markets. Wireless Connectivity Market by Connectivity Technology (Wi-Fi, Bluetooth, NFC, ZigBee, GNSS, LTE CAT-M1, NB-IoT, LoRa, SigFox), Type (WLAN, WPAN, LPWAN), End-use (Wearables, Consumer Electronics, Healthcare), and Region - Global Fore-cast to 2025. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-connectivity-market-192605963.html>
4. Key ICT indicators for developed and developing countries, the world and special regions (totals and penetration rates). – ITU. URL: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>.

5. The Mobile Economy 2020. – GSMA. URL: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf
6. LTE and 5G Subscribers: March 2021 – Q4. URL: <https://gsacom.com/paper/lte-and-5g-subscribers-march-2021-q4/>
7. IoT will dominate Bluetooth market in 2024. URL: <https://www.techrepublic.com/article/iot-will-dominate-bluetooth-market-in-2024/>
8. Public Wi-Fi: The next giant digital leap India needs to take or risk being left behind. URL: <https://www.financialexpress.com/opinion/public-wi-fi-the-next-giant-digital-leap-india-needs-to-take-or-risk-being-left-behind/1330725/>
9. Публичный Wi-Fi доступ в России: итоги 2019 года и ситуация на рынке в первой половине 2020. URL: <https://ict.moscow/research/rossiiskii-rynok-publichnykh-wi-fi-setei/>
10. Москва вошла топ-10 городов мира по уровню развития инноваций. URL: <https://ict.moscow/news/moskva-voshla-top-10-gorodov-mira-po-urovniu-razvitiia-innovatsii/>
11. *Варшавский Л.Е.* Исследование динамики структуры олигополистических рынков при нерыночных противодействиях сторон // Компьютерные исследования и моделирование. 2021 Т. 13 № 1. С. 219–233. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-1-219-233.
12. *Дымова И.А.* К вопросу о разворачивании сетей беспроводной связи пятого поколения (5G). Угрозы и риски// Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. Выпуск 27. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2020. DOI: 10.20537/mce2020econ10
13. CTIA. 2020 Annual Survey Highlights. URL: <https://www.ctia.org/news/report-2020-annual-survey-highlights>
14. The economic impact of wireless. URL: <https://www.wilx.com/2020/08/03/the-economic-impact-of-wireless/>
15. ЕМИСС. Государственная статистика. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/50445>
16. *Дубинина М.Г.* Современные тенденции мирового телекоммуникационного рынка // Научно-практический журнал "Концепции". - Москва. – 2020. С.18 – 27. DOI: 10.34705/KO.2019.14.39.003.
17. Telecommunications Carriers Association. URL: <https://www.tca.or.jp/english/database/index.html>

MODELLING DIFFUSION OF WIRELESS TECHNOLOGIES

Dubinina M.G.

The paper is devoted to the analysis of the main development trends, application fields and indicators of wireless technologies (including Wi-Fi and Wi-MAX). The diffusion models of wireless technologies are developed based on three types of models: econometric, time series and S-shaped curves.