

## О комбинаторных моделях поколений беспроводных систем связи<sup>1</sup>

Марк Ш. Левин

*Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия  
email: mslevin@acm.org*

Поступила в редколлегию 02.09.2017

**Аннотация**—В статье рассматриваются следующие вопросы: (1) краткий обзор беспроводных мобильных технологий, включая их эволюцию (поколения систем 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G); (2) использование иерархических комбинаторных моделей для описания поколений беспроводных систем связи; (3) использование двух-стадийного модульного метода улучшений (прогнозирования) версии поколения 5G беспроводной системы (на основе задачи блочного рюкзака). Примеры иллюстрируют предложенные подходы к моделированию и улучшению беспроводных систем связи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** беспроводная связь, модульная система, поколения систем, комбинаторные модели, улучшение, комбинаторная оптимизация

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возникла необходимость рассматривать поколения сложных технических и/или информационных систем. Некоторые примеры поколений прикладных систем указаны в таблице 1. Такое рассмотрение обычно направлено на анализ эволюции систем, прогнозирование усовершенствования (улучшения) систем в виде построения возможных новых поколений.

**Таблица 1.** Примеры поколений прикладных систем

Ном.	Система	Поколения	Источники
1.	Истребители	1, 2, 3, 4, 4 <sup>+</sup> , 4 <sup>++</sup> , 5, 6	[21, 39, 99]
2.	Системы ПВО/ПРО (Россия)	C75, C125, C200, C300, C400, C500	[6, 10, 27]
3.	Стандарты передачи мультимедийной информации	MPEG, MPEG-2, MPEG 4	[60, 63]
4.	Технологии беспроводной связи	0G, 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G, 7G	[12, 28, 32, 34, 41] [71, 92, 94, 105]

В таблице 2 указаны некоторые исследования в области эволюции и прогнозирования технологий связи (включая вопросы архитектуры систем, топологии систем связи, функций систем).

С точки зрения инновационных процессов можно выделить четыре класса влияний новых технологий в области систем связи [2, 15, 60]:

**1. Локальные модификации** (небольшие изменения, например, новые методы кодирования, поддержка обработки сигналов для большого числа антенн): 1.1. на уровне узлов сети связи, 1.2. на уровне архитектуры системы связи,

**2. Изменение/совершенствование компонентов системы:** изменение в проектировании классов узлов сетей связи.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-50-00150).

**3. Изменение архитектуры систем :** 3.1. изменение узлов/функций узлов (например, новые типы узлов, новые функции для существующих узлов), 3.2. изменения архитектуры системы (например, топологии сети связи), 3.3. расширение системы (т.е., добавление новых частей системы).

**4. Радикальные изменения:** изменения, влияющие одновременно и на узлы системы, и на архитектуру системы.

**Таблица 2.** Исследования эволюции систем беспроводной связи

Ном.	Исследование	Источники
1.	Моделирование эволюции топологии и маршрутизации в MANET	[104]
2.	Обзор поколений мобильных беспроводных технологий связи	[13]
3.	Исследование эволюции поколений: 2G, 3G, 4G	[42]
4.	Изменения и инновации применительно к поколению 4G (включая эволюцию: 1G, 2G, 3G, 4G)	[97]
5.	Эволюция применительно к сотовым системам 4G (LTE-Advanced)	[5]
6.	Сравнительное исследование 3G и 4G (мобильные технологии)	[54]
7.	Эволюция беспроводных систем связи (1G, 2G, 3G, 4G, 5G; парадигма зеленых технологий связи - green communication)	[1]
8.	Эволюция мобильных беспроводных сетей связи (1G, 2G, 3G, 4G, 5G)	[20, 83, 92]
9.	Исследование эволюции различных поколений мобильной связи (0G, 1G, 2G, 3G, 4G, 5G)	[71]
10.	Сравнительное исследование беспроводных технологий связи 3G, 4G и 5G	[28]
11.	Ключевые вызовы в системах радио-доступа в поколении 5G	[26]
12.	Эволюция сетей радио доступа	[102]
13.	Исследование поколения беспроводной сети связи 6G	[94]
14.	Технологии связи 5G и 6G	[34]
15.	Будущие технологии беспроводной связи 6G & 7G	[49]
16.	Вызовы и возможности последующих поколений сетей мобильной связи	[22, 36, 38]
17.	Вызовы и эволюция последующих поколений беспроводной связи	[105]
18.	Комбинаторный подход к моделированию эволюции модульных систем:	[56, 57, 59, 60]
18.1.	Комбинаторное моделирование эволюции стандартов типа MPEG	[60, 63]
18.2.	Комбинаторное моделирование эволюции и прогнозирования протоколов связи ZigBee	[58, 60, 65]
18.3.	Комбинаторное моделирование эволюции и прогнозирования требований к сетевой топологии	[61]
19.	Эволюция программно-определенных сетей (software defined networking - SDN)	[29, 51, 80, 96]
20.	История и вызовы виртуализации сетевых функций	[23, 74, 102]

В таблицах 3 и 4 указаны основные направления улучшения (развития) беспроводных мобильных систем связи. Следует отметить, что основные исследования эволюции (развития) прикладных технических систем базируются на инженерном анализе существующих технологий и основных трендов будущих улучшений. Комбинаторный подход для моделирования эволюции и прогнозирования модельных систем был предложен автором [56, 57, 59–61]. Данный метод основан на следующем: (i) иерархическое (в виде дерева) представление структуры исследуемой системы (в виде морфологического дерева с альтернативами для висячих вершин), (ii) анализ изменений системы (операция изменения/улучшения) между поколениями (например, между соседними поколениями системы), generations), (iii) оценивание системных изменений по критериям (например, по стоимости, по возможной полезности), (iv) моделирование процесса изменения/прогнозирования системы на основе моделей комбинаторной оптимизации: (a) выбор подмножества наилучших операций изменения (многокритериальное ранжирование или сортировка), (б) выбор подмножества наилучших операций изменения с

учетом общего ограничения на используемый ресурс(ы) (модели рюкзачного типа), (в) выбор подмножества наилучших операций изменения с учетом совместимости выбранных операций (модели типа морфологического проектирования на основе морфологической клики).

**Таблица 3.** Направления улучшения систем беспроводной мобильной связи, часть 1

Ном.	Технологическое направление	Источники
I.	Направления развития в 5G	[67]
1.1.	Новые радио-интерфейсы, методы посылки и приема	
1.2.	Новые сетевые архитектуры:	
1.2.1.	построение малых сот (одна точка - один пользователь)	
1.2.2.	центральная архитектура: облачные сети радио-доступа (RAN) на основе SDR	
1.2.3.	многомерные антенны для MIMO-технологий	
1.2.4.	физическое разделение трафика и управления между уровнями управления и передачи данных	
1.3.	Новые принципы использования спектра:	
1.3.1.	использование новых частотных полос (с 6 до 60 GHz)	
1.3.2.	гибкое совместное использование частотных ресурсов	
1.4.	Умные и адаптивные сети связи:	
1.4.1.	использование мобильных приложений с их оптимизацией для уменьшения стоимости радио-доступа	
1.4.2.	размещение и управление ресурсами в гетерогенных сетях	
1.4.3.	совместная меж-сетевая работа для различных технологий радио-доступа	
1.4.4.	сети с само-адаптацией и само-оптимизацией	
II.	Направления прорывных технологий для 5G:	[15]
2.1.	Аппаратно-центричная архитектура	
2.2.	Использование миллиметровых волн	
2.3.	MIMO-технологии (многоканальные)	
2.4.	Умные устройства	
2.5.	Поддержка для M2M связи	
III.	Преимущества 5G технологии:	[47]
3.1.	<i>Категория 1</i> (характеристики реального времени): быстрое время ответа (отклика), малая задержка при передаче пакетов, время запаздывания, высокая доступность	
3.2.	<i>Категория 2</i> (критическая инфраструктура): высокая надежность, приоритетный доступ, очень широкая область покрытия	
3.3.	<i>Категория 3</i> (очень высоко скоростная передача данных): частота передачи данных на уровне Gigabit, высокое качество покрытия, многоспектральный сервис	
3.4.	<i>Категория 4</i> (IoT, M2M): большое число соединенных устройств, глубокое покрытие внутри помещений, эффективность передачи сигналов	
3.5.	<i>Категория 5</i> (виртуализированная инфраструктура): технология виртуальных сетей (программно конфигурируемая сеть), изменяемая, низкочастотная система	

Данная статья направлена на использование указанного подхода автора к анализу поколений беспроводных мобильных систем связи (моделирование систем и их изменения). Представленные числовые примеры (для поколений систем связи, для процесса улучшения систем) имеют, в основном, иллюстративный характер. Эти примеры могут быть использованы как основа для анализа различных прикладных модульных систем (т.е., моделирование эволюции, улучшение/развитие, прогнозирование). Статья базируется на предварительном материале [62].

**Таблица 4.** Направления улучшения систем беспроводной мобильной связи, часть 2

Ном.	Технологическое направление	Источники
IV.	Перспективы (достоинства) поколения 5G:	[28]
4.1.	персонализация пользователя (высокая скорость передачи данных, доступ к большим базам данных и сервисов, гибкость)	
4.2.	разнородность терминалов и сети (различные типы доступа, например: WiMAX, WiFi, UMTS)	
4.3.	высокое быстродействие	
4.4.	возможность использования различных сервисов на основе различных провайдеров	
4.5.	интеллектуальные сетевые технологии	
4.6.	Сетевая конвергенция (конвергенция устройств и сервисов)	
4.7.	низкое потребление энергии	
V.	Перспективные направления применения ИИ в беспроводных сетях:	[26]
5.1.	эволюция технологии радиодоступа	
5.2.	уменьшение сот	
5.3.	композитная (составная) беспроводная инфраструктура	
5.4.	разнородные (гетерогенные) сети	
5.5.	гибкое управление спектром частот,	
5.6.	использование облачных систем	
VI.	Основные перспективы (достоинства) технологии 6G:	[34, 38, 49]
6.1.	сверх быстрый доступ к Интернет	[94, 105]
6.2.	высокая скорость передачи данных (до 10-11 Gbps)	
6.3.	умные дома, умные города	
6.4.	связь между спутниками (спутник - спутник)	

2. ПОКОЛЕНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

В последние годы проводятся активные исследования эволюции беспроводных систем связи [13, 28, 32, 42, 46, 53, 71, 92, 94, 97, 105]. Базовая цепочка эволюции поколений беспроводных технологий представлена на Рис. 1. В таблице 5 приведены краткие описания поколений систем:  $1G \rightarrow 2G \rightarrow 3G \rightarrow 4G \rightarrow 5G \rightarrow 6G$ .

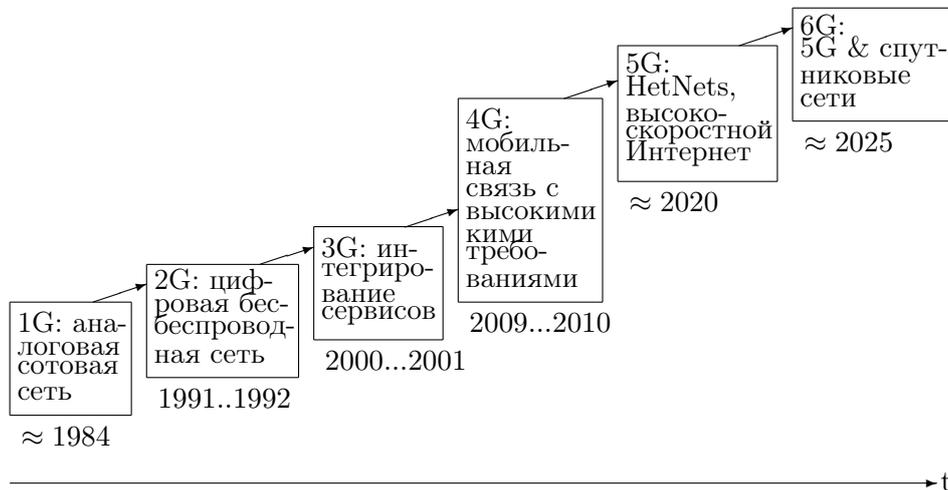


Рис. 1. Эволюция поколения беспроводных технологий

Таблица 5. Поколения беспроводных мобильных систем связи

Ном.	Поколение	Описание	Источники
1.	1G технология (сотовые телефоны, аналоговая беспроводная связь)	AMPS (Analog Mobile Phone System) FDMA (Frequency Division Multiple Access)	[13, 34, 92]
2.	2G технология (цифровая бес- проводная связь, GPRS, EDGE)		[13, 34, 76] [92]
2.1.	Базовая 2G технология	GSM стандарт: (a) TDMA (Time Division Multiple Access), (b) CDMA (Code Division Multiple Access)	[13, 34, 66] [70, 76, 88]
2.2.	2.5G GPRS (General Packet Radio Service)	Область переключаемых пакетов: (a) WAP, (b) MMS, (c) SMS	[13, 34]
2.3.	2.75G EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)	Расширенная версия GSM	[13]
3.	3G технология (Broad Band, IP Tech):	Улучшения (по сравнению 2.5G): (1) улучшение передачи аудио/видео данных, (2) увеличение в несколько раз скорости передачи данных (3) поддержка видео-конференций, (4) Web WAP браузеринг с высокой скоростью, (5) IPTV (TV через Интернет)	[13, 24, 34, 40] [54, 92]
3.1.	Базовая 3G технология	Версии: (1) W-CDMA, (2) GSM-EDGE, (3) UMTS, (4) DECT, (5) WiMAX, (6) CDMA 2000.	[13, 34, 40]
3.2.	3.5G-HSDPA (High-Speed Down- link Packet Access), W-CDMA	Цель: увеличение скорости передачи, реализация: AMC, MIMO, HARQ	[13, 34, 85]
3.3.	3.75G-HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access), UMTS/ WCDMA uplink evolution	улучшение: P2P приложения	[13, 53]
4.	4G технология:		
4.1.	Основная 4G (LTE, WiMAX, WiFi) (улучшенный WiMAX, 802.16, 3GPP, 3GPP2) (Интернет), сервис динамического доступа	Диапазон частот& сервисы; технологии: BDMA (Band Division Multiple Access), CDMA; сервисы: MMS, развлекательные программы, цифровое TV с высоким разрешением	[13, 18, 19] [30, 34, 35, 42] [50, 53, 54] [82, 92]
4.2.	4.5G (LTE Advanced Pro) (4 <sup>+</sup> G)	Частотный спектр: 1800 MHz ... 2100 MHz, мобильный Интернет, скорость 100 Mbit/sec	[5, 30, 31]
5.	5G технологии::		
5.1.	Основная 5G (IPv4): WLAN, 802.16 (WMAN), WPAN (Интернет), LTE-E (Long-Term Evolution-Enhanced), гетерогенные сети (HetNet), асинхронный HetNet сценарий	Мобильная революция (скорость доступа), сотовые телефоны с очень широкой полосой, Services: OWA, OTP, Multimedia, развлекательные программы, радиовещание, цифровое TV и др.	[1, 4, 7, 8, 11] [13, 15, 16, 22] [14, 25, 26, 33] [34, 37, 43, 44] [46, 67, 68, 71] [73, 75, 77, 79] [81, 84, 86, 87] [89, 92, 93, 95] [98, 101, 107]
5.2.	Мобильные облачные вычисления & 5G		[9, 45, 48, 55] [106]
5.3.	Mobile edge computing (MEC)&5G (периферийные вычисления)	3-уровневые гетерогенные MEC системы	[3, 69, 78, 91] [100]
6.	6G технология: 5G технология & спутниковые сети	Навигация, телекоммуникация, мониторинг земли и др.	[34, 49, 94]

3. СТРУКТУРНЫЕ ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ

В качестве базовой модели технологий телекоммуникации (и вычислительной системы) используется модель на основе семи уровней (Open System Interconnection model - OSI model) [72, 108]:

**Уровень 1.** Физический уровень layer ( $L^1$ ): Блок данных протокола: Функции: передача и прием потоков битов через физическим среду.

**Уровень 2.** Уровень связи данных ( $L^2$ ): Блок данных протокола: Кадр. Функции: Надежная передача потоков данных между двумя узлами, связанными посредством физического уровня.

**Уровень 3.** Сетевой уровень ( $L^3$ ): Блок данных протокола: Пакеты. Функции: Структуризация и управление много-узловой сетью, включая адресацию, маршрутизацию, управление трафиком.

**Уровень 4.** Транспортный уровень ( $L^4$ ): Блок данных протокола: Сегмент, Datagram. Функции: Надежная передача сегментов данных между точками сети (включая сегментацию, подтверждение, многоканальную передачу).

**Уровень 5.** Уровень сессий ( $L^5$ ): Блок данных протокола: Данные. Функции: Управление сессиями связи (i.e., управление диалогами (соединениями) между компьютерами; обмен информацией между двумя узлами).

**Уровень 6.** Уровень презентаций ( $L^6$ ): Блок данных протокола: Данные. Функции: Трансляция данных между сетевым сервисом и приложением.

**Уровень 7.** Прикладной уровень ( $L^7$ ): Блок данных протокола: Данные. Функции: Распределение ресурсов, удаленный доступ к файлам.

В результате структура системы  $S$  может быть представлена в виде морфологической иерархии из семи частей (Рис. 2), где для каждого уровня  $\kappa = \overline{1, 7}$  имеются альтернативные версии реализации:  $L_1^\kappa, \dots, L_{\iota_\kappa}^\kappa, \dots, L_{q_\kappa}^\kappa$ .



Рис. 2. Структура системы связи на основе семи уровней

Другая иерархическая модель сетей для предприятия (трех-уровневая модель для проектирования сети) была предложена Cisco [90] (Рис. 3):

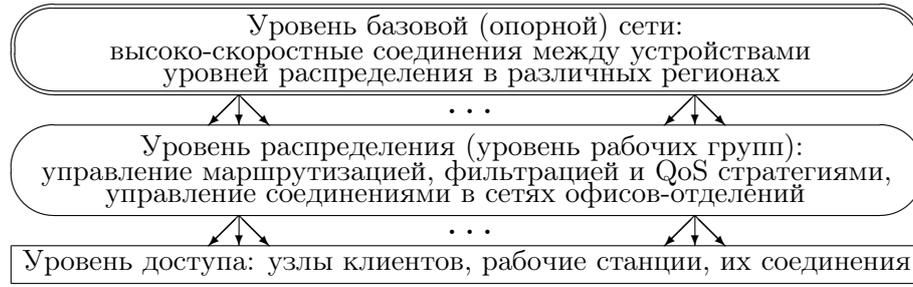


Рис. 3. Трех-уровневая модель сети предприятия

**1. Уровень доступа:** подключение узлов клиентов (например, рабочих станций) к сети. connecting client nodes (e.g., workstations) to the network.

**2. Уровень распределения (уровень рабочих групп):** управление маршрутизацией, фильтрацией, QoS стратегиями, управление соединениями в сетях офисов-отделений.

**3. Опорный уровень:** высоко-скоростные, высоко-надежные сервисы для пересылки пакетов между аппаратурой уровней распределения в различных регионах сети (устройства опорной/базовой сети управляют высоко-скоростными соединениями).

В качестве примера, следующая упрощенная морфологическая иерархическая структура может быть рассмотрена (Рис. 4):

**0.** Система  $S = A \star D \star C$ :

**1.** Уровень доступа  $A = E \star T$ : 1.1. узлы клиентов  $E$ , 1.2. соединения  $T$ .

**2.** Уровень распределения  $D = M \star W$ :

**2.1.** Управление  $M = R \star F \star Q$ : 2.1.1 маршрутизация  $R$ , 2.1.2. фильтрация  $F$ , 2.1.3. QoS стратегии  $Q$ .

**2.2.** соединения в сети офисов-отделений  $W$ .

**3.** Опорная (базовая) сеть  $C = H \star K$ :

**3.1.** высоко-скоростные соединения между устройствами уровня распределения  $H$ ,

**3.2.** топология опорной сети  $K$ .

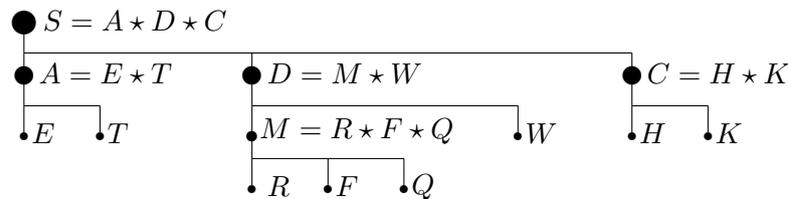


Рис. 4. Структура 3-уровневой модели сети предприятия

В данной работе исследуется следующая иерархическая структура беспроводной мобильной системы связи (упрощенная версия) (Рис. 5):

**0.** Беспроводная мобильная система связи  $S = B^1 \star B^2 \star B^3 \star B^4$ :

**1.** Описание  $B^1 = B^{11} \star B^{12}$ :

**1.1.** технология  $B^{11}$ : аналоговая сотовая технология  $B_1^{11}$ , цифровая сотовая технология  $B_2^{11}$ , пакеты данных  $B_3^{11}$ , цифровая широкополосная передача пакетов данных  $B_4^{11}$ , высоко-скоростная обработка на основе IP  $B_5^{11}$ , платформа на основе IP сети  $B_6^{11} = B_4^{11} \& B_5^{11}$ .

**1.2.** коммутация  $B^{12}$ : коммутация каналов  $B_1^{12}$ , коммутация пакетов  $B_2^{12}$ , коммутация каналов & коммутация пакетов  $B_3^{12} = B_1^{12} \& B_2^{12}$ .

**2.** Сервисы  $B^2 = B^{21} \star B^{22}$ :

**2.1.** сервис  $B^{21}$ : мобильный телефон (голос)  $B_1^{21}$ , оцифрованная речь  $B_2^{21}$ , SMS  $B_3^{21}$ , пакетированные данные  $B_4^{21}$ , оцифрованная речь & SMS & пакетированные данные  $B_5^{21} = B_2^{21} \& B_3^{21} \& B_4^{21}$ , интегрированные высоко-качественные аудио, видео данные  $B_6^{21}$ , динамический информационный доступ  $B_7^{21}$ , возможности ИИ  $B_8^{21}$ , динамический информационный доступ & возможности ИИ  $B_9^{21} = B_7^{21} \& B_8^{21}$ .

**2.2.** облачные вычисления  $B^{22}$ : нет  $B_1^{22}$ , облачные вычисления  $B_2^{22}$ ,

**3.** Передача данных & доступ  $B^3 = B^{31} \star B^{32}$ :

**3.1.** диапазон частот / скорость передачи / пропускная способность  $B^{31}$ : 2 kbps  $B_1^{31}$ , 64 kbps  $B_2^{31}$ , 400 kbps to 30 Mbps  $B_3^{31}$ , 3-5 Mbps, 100 Mbps (Wifi)  $B_4^{31}$ , 200 mbps to 1 Gbps  $B_5^{31}$ , approx 20 Gbps  $B_6^{31}$ .

**3.2.** многоканальная передача/технология доступа  $B^{32}$ : FDMA  $B_1^{32}$ , TDMA  $B_2^{32}$ , FDMA & TDMA  $B_3^{32} = B_1^{32} \& B_2^{32}$ , CDMA  $B_4^{32}$ , TDMA & CDMA  $B_5^{32} = B_2^{32} \& B_4^{32}$ , OFDMA  $B_6^{32}$ , LAS-CDMA  $B_7^{32}$ , OFDMA & LAS-CDMA  $B_8^{32} = B_6^{32} \& B_7^{32}$ .

**4.** Сети  $B^4 = B^{41} \star B^{42} \star B^{43} \star B^{44}$ :

**4.1.** опорная сеть  $B^{41}$ : PSTN  $B_1^{41}$ , GSM  $B_2^{41}$ , PSTN & GSM  $B_3^{41} = B_1^{41} \& B_2^{41}$ . пакет N/W  $B_4^{41}$ , Интернет  $B_5^{41}$ , пакет N/W & Интернет  $B_6^{41} = B_4^{41} \& B_5^{41}$ , спутниковая сеть  $B_7^{41}$ ,

пакет N/W & Интернет & спутниковая сеть  $B_8^{41} = B_4^{41} \& B_5^{41} \& B_7^{41}$ .

**4.2.** передача управления  $B^{42}$ : горизонтальная  $B_1^{42}$ , вертикальная  $B_2^{42}$ , горизонтальная & вертикальная  $B_3^{42} = B_1^{42} \& B_2^{42}$ .

**4.3.** гетерогенные (разнородные) сети (HetNets)  $B^{43}$ : нет  $B_1^{43}$ , агрегация различных сетей (HetNets)  $B_2^{43}$ .

**4.4.** космическая связь  $B^{44} = B^{441} \& B^{442}$ :

**4.4.1.** спутниковые сети  $B^{441}$ : нет  $B_1^{441}$ , телекоммуникационная сеть  $B_2^{441}$ , мониторинг земли  $B_3^{441}$ , навигация  $B_4^{441}$ , telecommunication & earth imaging & navigation телекоммуникационная сеть & мониторинг земли & навигация  $B_5^{441} = B_2^{441} \& B_3^{441} \& B_4^{441}$ .

**4.4.2.** спутниковые функции  $B^{442}$ : нет  $B_1^{442}$ , спутниковый роуминг  $B_2^{442}$ .



Рис. 5. Иерархическая модель беспроводной мобильной системы

В результате, можно рассмотреть следующие модульные описания системы:

- (1)  $S^{1G} = (B_1^{11} \star B_1^{12}) \star (B_1^{21} \star B_1^{22}) \star (B_1^{31} \star B_3^{32}) \star (B_1^{41} \star B_1^{42} \star B_1^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442})),$
- (2)  $S^{2G} = (B_2^{11} \star B_3^{12}) \star (B_5^{21} \star B_1^{22}) \star (B_2^{31} \star B_4^{32}) \star (B_3^{41} \star B_1^{42} \star B_1^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442})),$
- (3)  $S^{3G} = (B_4^{11} \star B_2^{12}) \star (B_6^{21} \star B_1^{22}) \star (B_3^{31} \star B_5^{32}) \star (B_4^{41} \star B_1^{42} \star B_1^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442})),$
- (4)  $S^{4G} = (B_5^{11} \star B_3^{12}) \star (B_7^{21} \star B_1^{22}) \star (B_4^{31} \star B_5^{32}) \star (B_5^{41} \star B_3^{42} \star B_1^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442})),$
- (5)  $S^{5G} = (B_6^{11} \star B_3^{12}) \star (B_8^{21} \star B_2^{22}) \star (B_5^{31} \star B_5^{32}) \star (B_5^{41} \star B_3^{42} \star B_2^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442})),$
- (6)  $S^{6G} = (B_6^{11} \star B_3^{12}) \star (B_9^{21} \star B_2^{22}) \star (B_6^{31} \star B_8^{32}) \star (B_8^{41} \star B_3^{42} \star B_2^{43} \star (B_5^{441} \star B_1^{442})).$

#### 4. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР УЛУЧШЕНИЯ СИСТЕМЫ

Здесь рассматривается иллюстративный пример двух-стадийного улучшения для варианта технологии 5G:  $S^{5G} \Rightarrow (S^{5G^{adv^1}} \rightarrow S^{5G^{adv^2}})$ , где  $S^{5G^{adv^1}}$  - система после стадии 1,  $S^{5G^{adv^2}}$  - система после стадии 2. Такая задача улучшения (прогнозирования) системы может быть интересна для коммуникационной организации (компании).

На Рис. 6 приведена схема двух-стадийного улучшения системы.

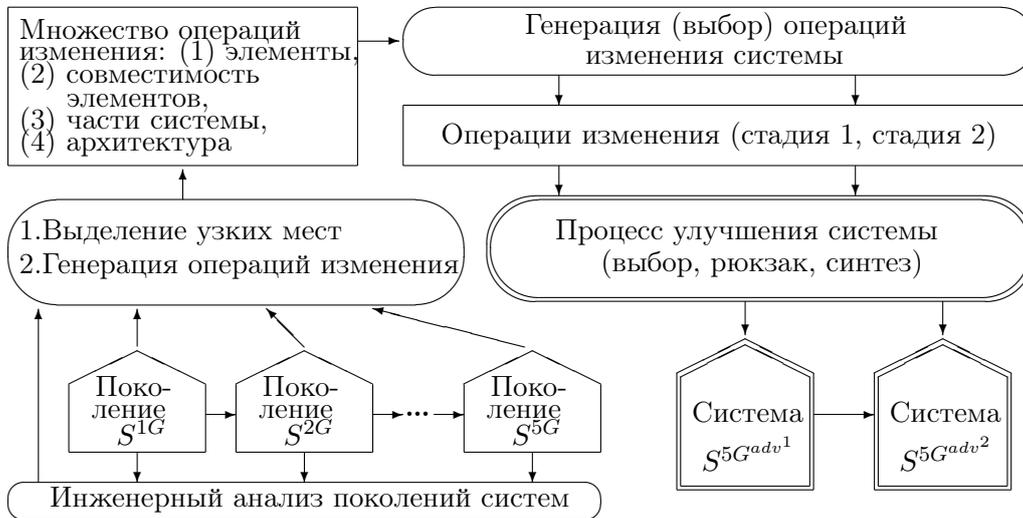


Рис. 6. Схема двух-стадийного улучшения системы

В качестве исходной версии системы используется следующая:  $S^{5G} = (B_6^{11} \star B_3^{12}) \star (B_8^{21} \star B_2^{22}) \star (B_5^{31} \star B_5^{32}) \star (B_5^{41} \star B_3^{42} \star B_2^{43} \star (B_1^{441} \star B_1^{442}))$ . При улучшении  $S^{5G}$  рассматриваются следующие компоненты (альтернативные варианты) системы (для изменения/улучшения): (1) сервис  $B_8^{21}$ ; (2) диапазон частот / скорость передачи / пропускная способность  $B_5^{31}$ ; (3) многоканальная передача/технология доступа  $B_5^{32}$ ; (4) опорная сеть  $B_5^{41}$ ; (5) спутниковая сеть  $B_1^{441}$ ; and (6) спутниковые функции  $B_1^{442}$ . Далее приведена две последовательные задачи улучшения (прогнозирования) (упрощенный случай, используется модель блочного рюкзака).

**Задача 1.** Структура составного улучшения  $S^{5G} \Rightarrow S^{5G^{adv^1}}$  для стадии 1 приведена на Рис. 7. В таблице 6 содержатся описания соответствующих операций улучшения. Соответствующая задача блочного рюкзака для  $S^{5G} \Rightarrow S^{5G^{adv^1}}$  имеет вид ( $q_1 = 2, q_2 = 2, q_3 = 4, q_4 = 4, q_5 = 5, b_1^{constr} = 19.0$ ):

$$\max \sum_{\iota=1}^6 \sum_{j=1}^{q_{\iota}} x_{\iota,j} c_{\iota,j} \quad s.t. \quad \sum_{\iota=1}^6 \sum_{j=1}^{q_{\iota}} x_{\iota,j} b_{\iota,j} \leq b_1^{constr}, \quad \sum_{j=1}^{q_{\iota}} x_{\iota,j} \leq 1 \quad \forall \iota = \overline{1,6}, \quad \forall j = \overline{1, q_{\iota}} \quad \forall x_{\iota,j} \in \{0, 1\}.$$

Используется упрощенная эвристика (последовательная упаковка элементов по величине  $\frac{c_{l,j}}{b_{l,j}}$ ).  
 Получается решение ( $I_1^1 = U_2^1 \star U_2^2 \star U_3^3 \star U_3^4 \star U_2^6$ ):

$$S^{5G^{adv^1}} = (B_6^{11} \star B_3^{12}) \star (B_9^{21} \star B_2^{22}) \star (B_6^{31} \star B_7^{32}) \star (B_7^{41} \star B_3^{42} \star B_2^{43} \star (B_2^{441} \star B_1^{442})).$$

Это решение используется как базовое для улучшения (прогнозирования) на стадии 2.

**Задача 2.** Структура составного улучшения  $S^{5G^{adv^1}} \Rightarrow S^{5G^{adv^2}}$  для стадии 2 приведена на Рис. 8. В таблице 7 содержатся описания соответствующих операций улучшения. Соответствующая задача блочного рюкзака для  $S^{5G^{adv^1}} \Rightarrow S^{5G^{adv^2}}$  имеет вид ( $q_1 = 2, q_2 = 2, q_3 = 4, q_4 = 2, b_2^{constr} = 17.5$ ):

$$\max \sum_{l=1}^4 \sum_{j=1}^{q_l} y_{l,j} c_{l,j} \quad s.t. \quad \sum_{l=1}^4 \sum_{j=1}^{q_l} y_{l,j} b_{l,j} < b_2^{constr}, \quad \sum_{j=1}^{q_l} y_{l,j} \leq 1 \quad \forall l = \overline{1,4}, \quad \forall j = \overline{1, q_l} \quad \forall y_{l,j} \in \{0, 1\}.$$

Используется упрощенная эвристика (последовательная упаковка элементов по величине  $\frac{c_{l,j}}{b_{l,j}}$ ).  
 Получается решение ( $I_1^2 = V_2^1 \star V_2^2 \star V_2^3 \star V_1^4$ ):

$$S^{5G^{adv^2}} = (B_6^{11} \star B_3^{12}) \star (B_9^{21} \star B_2^{22}) \star (B_6^{31} \star B_8^{32}) \star (B_8^{41} \star B_3^{42} \star B_2^{43} \star (B_3^{441} \star B_1^{442})).$$

Таким образом, получается следующая стратегия двух-стадийного улучшения (прогнозирования):

$$\Upsilon : < S^{5G^{adv}} \Rightarrow S^{5G^{adv^1}} \Rightarrow S^{5G^{adv^2}} >.$$

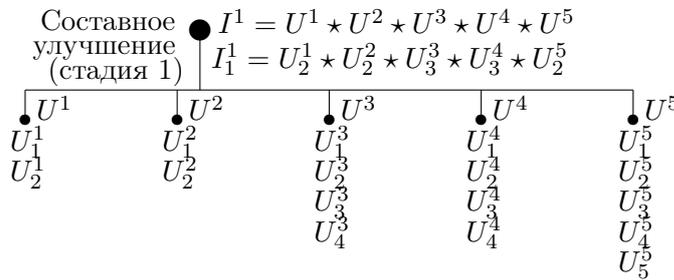


Рис. 7. Составное улучшение  $S^{5G} \Rightarrow S^{5G^{adv^1}}$

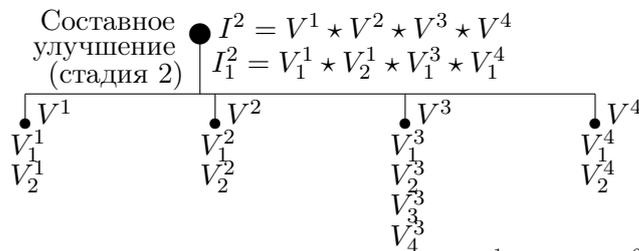


Рис. 8. Составное улучшение  $S^{5G^{adv^1}} \Rightarrow S^{5G^{adv^2}}$

**Таблица 6.** Операции изменения для  $S^{5G} \Rightarrow S^{5G^{adv^1}}$  (стадия 1)

Ном. $l$	Компонент системы	Альтер- натива	Операция изменения	Бинарная переменная	Полезность $c_{l,j}$	Стоимость $b_{l,j}$
1.	$B^{21}$ (сервис)	$B_8^{21}$ $B_9^{21}$	$U_1^1$ : Нет $U_2^1$ : $B_8^{21} \rightarrow B_9^{21}$	$x_{1,1}$ $x_{1,2}$	0.0 2.0	0.0 3.0
2.	$B^{31}$ (диапазон частот/ скорость передачи/ пропускная способность)	$B_5^{31}$ $B_6^{31}$	$U_1^2$ : Нет $U_2^2$ : $B_5^{31} \rightarrow B_6^{31}$	$x_{2,1}$ $x_{2,2}$	0.0 4.0	0.0 5.0
3.	$B^{32}$ (многоканальная передача/технология доступа)	$B_5^{32}$ $B_6^{32}$ $B_7^{32}$ $B_8^{32}$	$U_1^3$ : Нет $U_2^3$ : $B_5^{32} \rightarrow B_6^{32}$ $U_3^3$ : $B_6^{32} \rightarrow B_7^{32}$ $U_4^3$ : $B_7^{32} \rightarrow B_8^{32}$	$x_{3,1}$ $x_{3,2}$ $x_{3,3}$ $x_{3,4}$	0.0 1.0 3.6 3.6	0.0 2.0 4.0 6.0
4.	$B^{41}$ (опорная сеть)	$B_5^{41}$ $B_6^{41}$ $B_7^{41}$ $B_8^{41}$	$U_1^4$ : Нет $U_2^4$ : $B_5^{41} \rightarrow B_6^{41}$ $U_3^4$ : $B_6^{41} \rightarrow B_7^{41}$ $U_4^4$ : $B_7^{41} \rightarrow B_8^{41}$	$x_{4,1}$ $x_{4,2}$ $x_{4,3}$ $x_{4,4}$	0.0 3.6 7.0 9.0	0.0 6.0 7.0 12.0
5.	$B^{441}$ (спутниковая сеть)	$B_1^{441}$ $B_2^{441}$ $B_3^{441}$ $B_4^{441}$ $B_5^{441}$	$U_1^5$ : Нет $U_2^5$ : $B_1^{441} \rightarrow B_2^{441}$ $U_3^5$ : $B_2^{441} \rightarrow B_3^{441}$ $U_4^5$ : $B_3^{441} \rightarrow B_4^{441}$ $U_5^5$ : $B_4^{441} \rightarrow B_5^{441}$	$x_{5,1}$ $x_{5,2}$ $x_{5,3}$ $x_{5,4}$ $x_{5,5}$	0.0 5.0 5.6 6.0 14.0	0.0 5.0 7.0 8.0 20.0

Таблица 7. Операции изменения для  $S^{5G^{adv^2}} \Rightarrow S^{5G^{adv^2}}$  (стадия 2)

Ном. $l$	Компонент системы	Альтер- натива	Операция изменения	Бинарная переменная	Полезность $c_{l,j}$	Стоимость $b_{l,j}$
1.	$B^{32}$ (многоканальная передача/технологии доступа)	$B_7^{32}$ $B_8^{32}$	$V_1^1$ : Нет $V_2^1$ : $B_7^{32} \rightarrow B_8^{32}$	$y_{1,1}$ $y_{1,2}$	0.0 4.5	0.0 4.0
2.	$B^{41}$ (опорная сеть)	$B_7^{41}$ $B_8^{41}$	$V_1^2$ : Нет $V_2^2$ : $B_7^{41} \rightarrow B_8^{41}$	$y_{2,1}$ $y_{2,2}$	0.0 6.5	0.0 7.0
3.	$B^{441}$ (спутниковая сеть)	$B_2^{441}$ $B_3^{441}$ $B_4^{441}$ $B_5^{441}$	$V_1^3$ : Нет $V_2^3$ : $B_2^{441} \rightarrow B_3^{441}$ $V_3^3$ : $B_3^{441} \rightarrow B_4^{441}$ $V_4^3$ : $B_4^{441} \rightarrow B_5^{441}$	$y_{3,1}$ $y_{3,2}$ $y_{3,3}$ $y_{3,4}$	0.0 6.0 6.5 11.0	0.0 6.5 7.5 18.0
4.	$B^{442}$ (спутниковые функции)	$B_1^{442}$ $B_2^{442}$	$V_1^4$ : Нет $V_2^4$ : $B_1^{442} \rightarrow B_2^{442}$	$y_{4,1}$ $y_{4,2}$	0.0 12.0	0.0 30.0

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлена попытка автора исследовать эволюции поколений технологий беспроводных систем связи на основе комбинаторного подхода: использование иерархической модели системы, генерация операций изменения/улучшения, применение моделей комбинаторной оптимизации как основы процессов улучшений (прогнозирования) систем. Приведенные примеры иллюстрируют указанный подход. Представляется важным в дальнейшем провести исследования в следующих направлениях: 1. проведение аналогичного комбинаторного (модульного) анализа поколений различных прикладных систем (например, информационные системы, программные системы, двигатели, медицинская аппаратура); 2. анализ улучшения/эволюции частей беспроводных систем связи special analysis (например: подсистемы доступа, много-антенные технологии); 3. использование предложенного подхода и приложений в учебных процессах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abrol A., Jha R.K., Power optimization in 5G networks: a step towards green communication. IEEE Access, 2016, vol. 4, 1355–1374.

2. Afuah A., *Innovation Management: Strategies, Implementation and Profits*, Oxford Univ. Press, 2003.
3. Ahmed A., Ahmed E., A survey on mobile edge computing. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Syst. Control (ISCO)*, Coimbatore, India, pp. 1–8, 2016.
4. Akhtar A.M., Wang X., Hanzo L., Synergistic spectrum sharing in 5G HetNets: A harmonized SDB-Enabled approach. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 53, no. 1, pp. 40–47.
5. Akyildiz I.F., Gutierrez-Estevez D.M., Reyes E.C., The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced. *Phys. Commun.*, 2010, vol. 3, no. 4, pp. 217–244.
6. Andrew M., A strategic assessment of PLA theatre missile and ASAT capabilities. *Air Power Australia Analyses*, 2010, vol. 7, no. 2.
7. Andrews J., The seven ways hetnets are a paradigm shift. *IEEE Commun. Mag.*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 136–144.
8. Andrews J.G., Buzzi S., Choi W., Hanli S.V., Lozano A., Soong A.C.K., Zhang J.C., What will 5G be? *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082.
9. Barbarossa S., Sardellitti S., Lorenzov P.D., Communicating while computing: Distributed mobile cloud computing over 5G heterogeneous networks. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2014, vol. 31, no. 6, pp. 45–55.
10. Barton D.K., Recent developments in Russian radar systems. In: *Proc. of IEEE Int. Radar Conf.*, Washington, DC, USA, pp. 340–346, 1995.
11. Berardinelli G., Pedersen K.I., Sorensen T.B., Mogensen P., Generalized DFT-Spread-OFDM as 5G waveform. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 54, no. 11, pp. 99–105.
12. Berezdivin R., Breinig R., Topp R., Next generation wireless communications concepts and technologies. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, vol. 40, no. 3, pp. 108–116.
13. Bhala M.R., Bhala A.V., Generations of mobile wireless technology: A survey. *Int. J. of Computer Applications*, 2010, vol. 5, no. 4, pp. 26–32.
14. Bhushan N., Li J., Malladi D., Gilmore R., Brenner D., Damnjanovic A., Sukhavasi R., Patel C., Geirhofer S., Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 82–89.
15. Boccardi F., Health R.W., Lozano A., Marzetta T.L., Popovski P., Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 74–80.
16. Bockelmann C., Pratas N., Nikopour H., Au K., Svensson T., Stefanovic C., Popovski P., Dekorsy A., Massive machine-type communications in 5G: physical and MA C-layer solutions. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 54, no. 9, pp. 59–64.
17. Bondan L., Santos C.R.P.d., Granville L.Z., Management requirements for ClickOS-based network function virtualization. In: *2014 10th Int. Conf. on Network and Service Management (CNSM)*, pp. 447–450. 2014.
18. Boudreau G., Panicker J., Guo N., Chang R., Wang N., Vrzic S., Interference coordination and cancellation for 4G networks. *IEEE Commun. Mag.*, 2009, vol. 47, no. 4, pp. 74–81.
19. Bria A., Gessler F., Queseth O., Stridth R., Unbehaun M., Wu J., Zender J., 4 generation wireless infrastructure: scenarios and research challenges. *IEEE Personal Communications*, 2001, vol. 8, no. 6, pp. 25–31.
20. Cheng-Xiang W., et al., Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, pp. 122–130.
21. Chiesa S., Fioriti M., About feasibility of a 5th generation light fighter aircraft. *J. of Mechanical Engineering and Automation*, 2014, vol. 4, no. 5, pp. 441–450.
22. Chin W.H., Fan Z., Haines R., Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. *IEEE Wireless Commun.*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 106–112.

23. Chowdhury N.M.K., Boutaba P., A survey of network virtualization. *Computer Networks*, 2010, vol. 54, no. 5, pp. 862–876.
24. Chuang J., Sollenberger N., Beyond 3G: Wideband wireless data access based on OFDM and dynamic packet assignment. *IEEE Commun. Mag.*, 2000, vol. 38, pp. 78–87.
25. Dahlman E. et al., 5G wireless access: requirements and realization. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, no. 12, pp. 42–47.
26. Demestichas P., Georakopoulos A., Karvounas D., Tsagkaris K., Stavroulaki V., Lu J., Xiong C., Yao J., 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 47–53.
27. Efremov V.P., SA-12 system overview. Seminar at IEEE National Radar Conf., Atlanta, GA, USA, 29-31 March, 1994.
28. Fagbohun O.O., Comparative studies on 3G, 4G and 5G wireless technology. *IOSR J. of Electronics and Communication Engineering*, 2014, vol. 9, no. 3, pp. 88–94.
29. Feamster N., Rexford J., Zegura E., The road of SDN: an intellectual history of programmable networks. *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 87–98.
30. Ghosh A., Ratasuk R., Mondai B., Mangalvedhe N., Thomas T., LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology. *IEEE Wireless Commun.*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 10–22.
31. Ghosh A., Zhang J., Andrews J.G., Muhamed R., *Fundamentals of LTE*, Prentice-Hall, 2011.
32. Gill J., Singh S., Future prospects of wireless generations in mobile communication. *Asian J. of Computer Science and Technology*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 18–22.
33. Gohil A., Patel S.K., 5G technology of mobile communication: A survey. In: 2013 Int. Conf. on Intelligent Systems Processing (ISSP), pp. 288–292, 2013.
34. Goswami K., Sahu K., Shukla A., Upcoming technologies: 5G and 6G. In: National Conf. on Knowledge, Innovation in Technology and Engineering (NCKITE), 10-11 Apr. 2015, India, pp. 35–37, 2015.
35. Govil J., Govil J., 4G mobile communication systems: turns, trends and transition. In: Int. Conf. on Convergence Information Technology (ICCIT 2007), pp. 13–18, 2007.
36. Han B., Gopalakrishnan V., Ji L., Lee S., Network function virtualization: challenges and opportunities for innovation. *IEEE Commun. Mag.*, 2015, vol. 53, no. 2, pp. 90–97.
37. Hasan S.F., 5G communication technology. In: *Emerging Trends in Communication Networks*, Springer, pp. 59–69, 2014.
38. Hawilo H., Shami A., Mirahmadi M., Asal R., NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC). *IEEE Networks*, 2014, vol. 28, no. 6, pp. 18–26.
39. Hebert A.J., Fighter generations. *Air Force Magazine*, Sep. 2008, p. 32.
40. Hillebrand F., *GSM and UMTS, the Creation of Global Communications*. Wiley, 2001.
41. Hossain S., 5G wireless communication systems. *American J. of Engineering Research*, 2013, vol. 2, no. 10, pp. 344–353.
42. Hui S.Y., Yeung K.H., Challenges in the migration to 4G mobile systems. *IEEE Commun. Mag.*, 2003, vol. 41, no. 12, pp. 54–59.
43. Imran A., Zoha A., Challenges in 5G: how to empower SON with big data for enabling 5G. *IEEE Network*, 2014, vol. 28, pp. 27–33.
44. Jiang T., Mao S., Zhang Z., Chen D. (eds), Special issue on “Next Generation Wireless Communication Technologies”, *Digital Communications and Networks*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 159–161.
45. Jo M., Maksymyuk T., Strykhalyuk B., Cho C.-H., Device-to-device-based heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing. *IEEE Wireless Commun.*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 50–58.

46. Kachhavay M.G., Thakare A.P., 5G technology-evolution and revolution. *Int. J. of Computer Science and Mobile Computing*, 2014, vol. 3, no. 3, pp. 1080–1087.
47. Kadir E.A., Shamsuddin S.M., Rahman T.A., Ismail A.S., Big data network architecture and monitoring use wireless 5G technology. *Int. J. Advanced Soft Compu. Appl.*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 1–14.
48. Khan A.u.R., Othman M., Madani S.A., Khan S.U., A survey of mobile cloud computing application models. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 393–413.
49. Khutey R., Rana G., Dewangan V., Tiwari A., Dewamngan A., Future of wireless technology 6G&7G. *Int. J. of Electrical and Electronic Research*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 583–585.
50. Kim Y.K., Prasad R., 4G Roadmap and Emerging Communication Technologies. Artech House, 2006.
51. Kreutz D., Ramos F.M.V., Verissimo P.E., Rothenberg C.E., Azodolmolky S., Uhlig S., Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proc. of the IEEE*, 2015, vol. 103, no. 1, pp. 14–76.
52. Kumar A., Liu Y., Sengupta J., Divya, Evolution of mobile wireless communication networks 1G to 4G. *Int. J. of Electronics& Communication Technology (IJECT)*, 2010, vol 1, no. 1, pp. 68–72.
53. S. Kumar, T. Agrawal, P. Singh, A future communication technology: 5G. *Int. J. of Future Generation Communication and Networking*, 2016, 9(1), 303–310.
54. K. Kumaravel, Comparative study of 3G and 4G in mobile technology. *Int. J. of Computer Science*, 2011, 8(5), 256–263.
55. Kwak J., Kim Y., Lee J., Chong S., Dream: dynamic resource and task allocation for energy minimization in mobile cloud systems. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2015, vol. 33, no. 12, pp. 2510–2523.
56. Levin M.Sh., Combinatorial evolution of composite systems. In: 16th Eur. Meeting on Cybern. and Syst. Res., vol. 1, Austria, pp. 275–280, 2002.
57. Levin M.Sh., *Composite Systems Decisions*. Springer, 2006.
58. Levin M.Sh., Towards communication network development (structural system issues, combinatorial models). In: 2010 IEEE Region 8 Int. Conf. SIBIRCON-2010, vol. 1, pp. 204–208, 2010.
59. Levin M.Sh., Towards combinatorial evolution of composite systems. *Expert Systems with Applications*, 2013, vol. 40, no. 4, pp. 1342–1351.
60. Levin M.Sh., *Modular System Design and Evaluation*. Springer, 2015.
61. Levin M.Sh., Note on evolution and forecasting of requirements: communications example. *Electr. prepr.*, 8 p., May 22, 2017. <http://arxiv.org/abs/1705.07558> [cs.NI]
62. Levin M.Sh., Towards combinatorial modeling of wireless technology generations. *Electr. prepr.*, 20 p., Sep. 2, 2017. <http://arxiv.org/abs/1708.08996> [cs.NI]
63. Levin M.Sh., Kruchkov O., Hadar O., Kaminsky E., Combinatorial systems evolution: example of standard for multimedia information. *Informatica*, 2009, vol. 20, no. 4, pp. 519–538.
64. Levin M.Sh., Andrushevich A., Kistler R., Klapproth A., Combinatorial evolution of ZigBee protocol. In: 2010 IEEE Region 8 Int. Conf. SIBIRCON-2010, vol. 1, pp. 314–319, 2010.
65. Levin M.Sh., Andrushevich A., Kistler R., Klapproth A., Combinatorial evolution and forecasting of communication protocol ZigBee. *Electr. prepr.*, 6 p., Apr. 15, 2012. <http://arxiv.org/abs/1204.3259> [cs.NI]
66. Lin Y.-B., OA&M for GSM network. *IEEE Network*, 1997, vol. 11, no. 2, pp. 46–57.
67. Maeder A., Ali A., Bedekar A., Cattoni A.F., Chandramouli D., Chandrashekar S., Du L., Hesse M., Sartori C., Turtinen S., A scalable and flexible radio access network architecture for fifth generation mobile networks. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 54, no. 11, pp. 16–23.
68. Marsch P., Da Silva I., Bulakeci O., Tesanovic M., El Ayoubi S.E., Rosowski T., Kaloxylos A., Boldi M., 5G radio access network architecture: design guidelines and key considerations. *IEEE Commun. Mag.*, 2016, vol. 54, no. 11, pp. 24–32.

69. Mao Y., You C., Huang K., Letaief K.B., Mobile edge computing: survey and research outlook. *Electr. prepr.*, 30 p., Jan. 11, 2017. <http://arxiv.org/abs/1701.01090> [cs.IT]
70. Mehrotra A., *GSM System Engineering*. Artech House, Boston, 1997.
71. Mehta H., Patel D., Joshi B., Modi H., 0G to 5G mobile technology: A survey. *J. of Basic and Applied Engineering Research*, 2014, vol. 1, no. 6, pp. 56–60.
72. Miao G., Song G., *Energy and Spectrum Efficient Wireless Network Design*. Cambridge Univ. Press, 2014.
73. Michailow N., Matthe M., Gaspar I.S., Caldevilla A.N., Mendes L.L., Festag A., Fettweis G., Generalized frequency division multiplexing for 5th generation cellular networks. *IEEE Trans. Commun.*, 2014, vol. 62, no. 9, pp. 3045–3061.
74. Mijumbi R., Serrat J., Gorricho J.-L., Bouten N., De Turck F., Boutaba R., Network function virtualization: state-of-the art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 236–262.
75. Mitra R.N., Agrawal D.P., 5G mobile technology: A survey. *ICT Express*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 132–137.
76. Mouly M., Pautet M.-B., *The GSM System for Mobile Communications*. Artech House, 1992.
77. Mumtaz S. et al., Direct mobile-to-mobile communication: paradigm for 5G. *IEEE Wireless Commun.*, 2014, vol. 21, no. 5, pp. 14–23.
78. Munoz O., P-Iserte A., Vidal J., Joint optimization of radio and computational resources for multicell mobile-edge computing. *IEEE Trans. Signal Info. Process. Over Networks*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 89–103.
79. Naik G., Aigal V., Sehgal P., Poojari J., Challenges in the implementation of fourth generation wireless systems. *Int. J. of Engineering Research and Applications*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 1353–1355.
80. Nunes B.A.A., Mendinca M., Nguen X.-N., Odraszka K., Turletti T., A survey of software-defined networking: past, present, and future of programmable networks. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2014, vol. 16, no. 3, pp. 1617–1634.
81. Osseiran A. et al., Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project. *IEEE Commun. Mag.*, 2014, vol. 52, no. 5, pp. 26–35.
82. Parikh J., Basu A., LTE advanced: The 4G mobile broadband technology. *Int. J. of Computer Applications*, 2011, vol. 13, no. 5, pp. 17–21.
83. Patel S., Malhar C., Kapadiya K., 5G: Future mobile technology - Vision 2020. *Int. J. of Computer Applications*, 2012, vol. 54, no. 17, pp. 6–10.
84. Patil S., Patil V., Bhat P., A review on 5G technology. *Int. J. of Engineering and Innovative Technology*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 26–30.
85. Pedersen K., Morgensen P., Kolding T., Overview of QoS options for HSDPA. *IEEE Commun. Mag.*, 2006, vol. 44, no. 7, pp. 100–105.
86. Peng M., Li Y., Zhao Z., Wang C., System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 2015, vol. 29, no. 2, pp. 6–14.
87. Pirinen P., A brief overview of 5G research activities. In: 2014 1st Int. Conf. on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU). pp. 17–22, 2014.
88. Rahnema V., Overview of the GSM systems and protocol architecture. *IEEE Commun. Mag.*, 1993, vol. 21, no. 4, pp. 92–100.
89. Rappaport T.S. et al., Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work. *IEEE Access*, May 2013, vol. 1, pp. 335–349.
90. Raza K., Turner M., *Cisco Network Topology and Design*, Cisco Press, 2002.

91. Sabella D., Vaillant A., Kuure P., Rauschenbach U., Giust F., Mobile-edge computing architecture: The role of MEC in the Internet of Things. *IEEE Consum. Electron. Mag.*, 2016, vol. 5, no. 4, 84–91.
92. Sharma P., Evolution of mobile wireless communication networks - 1G to 5G as well future prospective of next generation communication network. *Int. J. of Computer Science and Mobile Computing*, 2013, vol. 2, no. 8, pp. 47–53.
93. Siddiqui M.M., Vision of 5G communication. In: *High Performance Architecture and Grid Computing*. Springer, pp. 252–256, 2011.
94. Singh A.P., Nigam S., Gupta N.K., A study of next generation wireless network 6G. *Int. J. of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2007, vol. 4, no. 1, pp. 871–874.
95. Singh S., Singh P., Key concepts and network architecture for 5G mobile networks. *Int. J. of Scientific Research Engineering & Technology*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 165–170.
96. Singh S., Jha R.K., A survey on software defined networking: Architecture for next generation network. *J. of Network and Systems Management*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 321–374.
97. Suryanegara M., Miyazaki K., Technological changes in the innovation system towards 4G mobile service. *Int. J. of Technology, Policy and Management*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 375–394.
98. Thompson J., Ge X., Wu H.C., Irmer R., Jiang H., Fettweis G., Alamouti S., 5G wireless communication systems: prospects and challenges. *IEEE Communication Mag.*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 62–64.
99. Tirpak J.A., The sixth generation fighter. *Air Force Magazine*, Oct. 2009, pp. 38–42.
100. Tran T.X., Hajisami A., Pandey P., Pompili D., Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. *Electr. prepr.*, 7 p., Apr. 11, 2017. <http://arxiv.org/pdf/1612.03184> [cs.NI]
101. Tudzarov A., Janevski T., Functional architecture for 5G mobile networks. *Int. J. of Advanced Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 65–78.
102. Vaezi M., Zhang Y., *Cloud Mobile Networks*. Springer, 2017.
103. Weilkiens T., Lamm J.G., Roth S., Walker M., *Model-Based System Architecture*. Wiley, 2015.
104. Wu X., Sadjadpour H.R., Garcia-Luna-Aceves J.J., Modeling of topology evolutions and implication on proactive routing overhead in MANETs. *Comp. Commun.*, 2008, vol. 31, no. 4, pp. 782–792.
105. Yadav R., Challenges and evolution of next generations wireless communication. In: *Proc. of the Int. MultiConf. of Engineers and Computer Scientists IMECS 2017*, March 15-17, Hong Kong, 2017.
106. You C., Huang K., Chae H., Energy efficient mobile cloud computing powered by wireless energy transfer. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2016, vol. 34, no. 5, pp. 1757–1771.
107. Zhou X., Zhao Z., Li R., Zhou Y., Chen T., Niu Z., Zhang H., Toward 5G: When explosive bursts meet soft cloud. *IEEE Network*, 2014, vol. 28, no. 6, pp. 12–17.
108. Zimmermann H., OSI Reference Model - The ISO model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Trans. on Communications*, 1980, vol. 28, no. 4, pp. 425–432.

## On combinatorial models for generations of wireless communication systems

Levin M.Sh.

The article addresses the following: (1) brief description of wireless mobile technologies including their evolution (system generations 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, 6G); (2) usage of hierarchical combinatorial models for presentation of wireless communication systems; (3) usage of two-stage improvement strategy for a version of generation 5G (on the basis of multiple choice problem). Examples illustrate the suggested approaches for modeling and improvement of wireless communication systems.

**KEYWORDS:** wireless communication, modular system, system generations, combinatorial models, improvement, combinatorial optimization