

УДК 621.3.006.357

DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>

К. А. Селиванов, Б. П. Муляр, Ю. Ю. Коляденко, Н. В. Москалец

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА В ГРУППИРОВКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ 5G

Предмет: модели взаимодействия и фазовые состояния при распределении частотного ресурса в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G. **Цель:** разработка динамической модели множественных взаимодействий n -элементов сложной системы мобильной связи 5G, в которой учтены характер межэлементных связей и фазовых состояний при групповом использовании частотного ресурса. **Задачи:** на основе сложной модели n -элементной системы с множественными взаимодействиями разработать математическую модель описания электромагнитной обстановки группировки радиоэлектронных средств в пространстве состояний при групповом использовании частотного ресурса; провести анализ фазовых состояний взаимодействия элементов системы группировки радиоэлектронных средств системы мобильной связи при которых они смогут функционировать без ухудшения качественных показателей, которые отражают суммарный уровень группового влияния излучающих элементов на приемные устройства, в условиях оптимального распределения частотного ресурса; провести анализ фазовых состояний взаимодействия элементов системы группировки радиоэлектронных средств системы мобильной связи при которых они смогут функционировать без ухудшения качественных показателей в условиях оптимального распределения частотного ресурса. **Методы:** математический метод пространства состояний системы, описывающей нелинейный характер и фазовые состояния системы с учетом интенсивности взаимодействия её элементов. **Результаты:** Разработана математическая модель электромагнитной обстановки группировки радиоэлектронных средств, характеризующая нелинейный характер взаимодействий при групповом использовании частотного ресурса. Получено рекуррентное выражение для моделирования оценки совокупного характера электромагнитных взаимодействий в группировке радиоэлектронных средств. Проведено моделирование динамики взаимодействий и фазовых состояний группировки радиоэлектронных средств при групповом использовании частотного ресурса. **Выводы:** Показано, что с помощью модели, моделирующей динамику взаимодействий группировки РЭС, можно анализировать ее состояние в будущем. Данная модель позволяет выполнять анализ группировки радиоэлектронных средств при различных, конкретных параметрах отдельных типов радиоэлектронных средств, характер и интенсивности их взаимодействия в группировке при действующем распределении ресурсов.

Ключові слова: динамическая модель; множественные взаимодействия; электромагнитная обстановка; распределение ресурсов; распределение частот.

Введение (постановка задачи)

В последние десятилетия во всем мире стремительно развиваются инфокоммуникационные технологии, которые непосредственно влияют на развитие экономики, образования, науки, здравоохранения, культуры и образа жизни человека. По данным Международного Союза Электросвязи (ITU–International Telecommunication Union) (МСЭ) уже в 2012 году Интернетом пользовался каждый третий житель Земли, и число пользователей неуклонно растет. Инфокоммуникационные технологии (ИКТ) и услуги на базе широкополосного доступа год от года становятся все более доступными для населения, в том числе и по стоимости.

Сети мобильной связи пятого поколения призваны обеспечить все возрастающие потребности в получении современных информационных услуг мобильных пользователей [1-9]. Сети 5G играют ключевую роль в превращении городов в разумные города, что позволит гражданам и обществу в целом, получить социально-экономические выгоды, которые дает передовая цифровая экономика с интенсивным использованием данных [10]. Технология нового поколения 5G / IMT-2020, как и любая новая технология, привносит свои специфические особенности во все аспекты, касающиеся практики ее применения. Одним из таких особо важных аспектов

является электромагнитная совместимость (ЭМС). На этапе подготовки к внедрению радиосетей технологии 5G, названной NewRadio (NR), необходимо заблаговременно позаботиться о принятии мер по эффективной оценке условий ЭМС для этих сетей на основе тщательного анализа особенностей технологии 5G, а правильно и точно оценив эти условия – успешно обеспечить электромагнитную совместимость радиосредств новых сетей.

Для внедрения 5G кабинет министров Украины утвердил план использования радиочастотного ресурса до 2025 года. Эти изменения позволят пользователям получать более стабильные и высокие скорости передачи информации.

МСЭ с 1995 года стал международным координатором работ по электросвязи, направленных на создание глобального информационного общества. Создав Регламент радиосвязи [11] и разделив поверхность Земли на три региона, МСЭ организовал определенный порядок в частотном пользовании. Однако частотный ресурс, принадлежит всему человечеству, исключительно активно используется и по сей день частотные диапазоны ниже 5 ГГц практически перегружены. Присвоение радиочастот и радиочастотных каналов для радиоэлектронных средств в этих диапазонах осуществляется по технологиям частотно-территориального планирования (ЧТП) [12-14] с обязательным расчетом ЭМС радиосредств.

Ключевыми решениями и технологическими компонентами [1-4] сети радиодоступа 5G NR являются:

1) использование новых форм сигнала, получивших название Non-Orthogonal Waveform и дающих выигрыш в спектральной эффективности по отношению к OFDM;

2) применение полного дуплекса FD - одновременной передачи и приема в общей полосе частот, преимущественно в коротких соединениях "точка-точка" (D2D, V2V);

3) применение многомерных антенн MIMO, в которых эффективно реализуется режим динамического формирования направленных лучей для передачи (3D / Beamforming), что позволяет увеличить энергетический выигрыш в ожидаемых высоких диапазонах частот и улучшить покрытие и спектральную эффективность в ультра-плотных малых сотах;

4) применение малых сот Small Cell со сверхплотным распределением (один приемопередатчик на каждого пользователя), разгружая макросотами сети с разделением сред передачи команд управления и пользовательского трафика между макро- и Small-сотах в различных полосах частот (концепция "PhantomCell»).

Радиочастоты для сетей 5G – это одна из главных компонент, оказывает существенное влияние на ЭМС [6, 9, 12].

На Всемирной конференции радиосвязи ВКР-15 были определены новые диапазоны радиочастот для 5G, в том числе диапазоны сантиметровых и миллиметровых волн [12]. В целом этот радиочастотный спектр размещен в трех областях: ниже 1 ГГц, от 1 ГГц до 6 ГГц и выше 6 ГГц (до 100 ГГц).

В качестве главных особенностей этого спектра с точки зрения ЭМС можно выделить следующее: возможность использования широкой непрерывной полосы канала (суммарно до 1-2 ГГц), малые зоны обслуживания (дальность излучения) в малых (Small) и ультра-малых (UltraSmall) сотах; возможность использования малагабаритных многоэлементных антенн MIMO с узкими лучами как в базовых станциях, так и в абонентских устройствах; различный характер потерь при распространении сигнала, в частности, значительное влияние на уровень потерь дополнительных ранее неизвестных в сотовой связи факторов [15-18].

Учитывая особенности сетей 5G актуальной научной задачей, является разработка модели взаимодействия в группировке радиоэлектронных средств при распределении частотного ресурса в сетях мобильной связи.

Анализ последних достижений и публикаций

В 5G-NR используются OFDM поднесущие с различной шириной спектра – 15кГц, 30кГц, 60кГц, 120кГц и 240кГц (табл. 1) [19].

Таблица 1. Нумерология стандарта 5G-NR

u (нумерология)	$\Delta F=2^u \cdot 15$ [кГц]	Циклический префикс
0	15 (соответствует LTE)	Normal
1	30	Normal
2	60	Normal, Extended
3	120	Normal
4	240	Normal

Использование различных нумерологий открывает широкие возможности для гибкой настройки поведения сети при предоставлении тех или иных услуг, например, для приложений критичных к уровню задержек, уместно использовать поднесущие с широким спектром при меньшей длительности символа, и наоборот, при передаче трафика широкополосного доступа в Интернет и низкоскоростного трафика Интернета вещей – использовать "узкие" поднесущие [20].

В 5G-NR передача данных в восходящем (Uplink – UL) и нисходящем (Downlink – DL) направлениях организуется на основе фреймов, длительностью $T_f = 10$ мс. Каждый фрейм делится на 10 субфреймов, длительностью $T_{sf} = 1$ мс каждый. Также каждый субфрейм делится на два полужада (half-frame 0 и half-frame 1). Каждый субфрейм делится на слоты; количество слотов определяется шириной спектра поднесущей и составляет 1, 2, 4, 8 или 16 слотов (в отличие от сетей LTE-FDD, где используется единая структура с двумя слотами на каждый субфрейм) [21].

В 5G-NR количество OFDM символов, приходящихся на один слот, не зависит от нумерологии и, по аналогии с сетями 4G-LTE, определяется только типом циклического префикса: 14 символов для нормального и 12 – для расширенного префикса. На рис. 1 приведена диаграмма OFDM-символов на сетке координат "частота"- "время" [22,23].

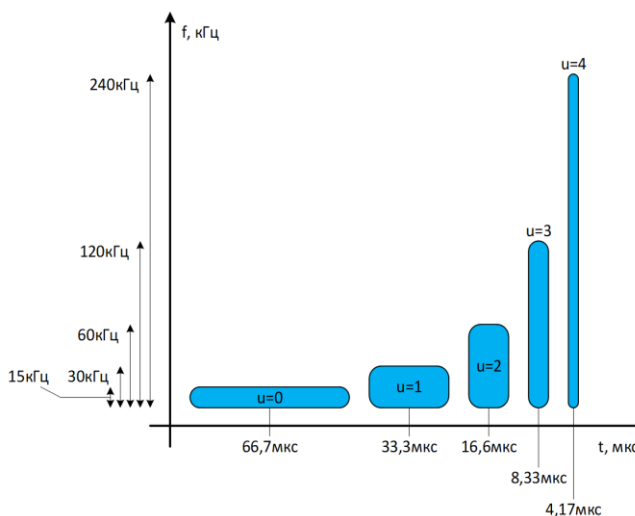


Рис. 1. OFDM символы

По аналогии с 4G-LTE единицей частотно-временного ресурса в сетях 5G-NR является

ресурсный блок – RB (Resource Block). Каждому абонентскому терминалу на определенный период времени для приема/передачи данных выделяется некоторое, определенное планировщиком системы, количество ресурсных блоков. Каждый ресурсный блок в частотной области содержит 12 смежных поднесущих частот. Ширина полосы частот одного ресурсного блока зависит от используемой нумерологии. В рамках одного радиоканала может использоваться несколько нумерологий [22].

Назначение частотно-временных блоков для передачи сигналов АС происходит в результате процедуры планирования (распределения) физических ресурсов. Цель этой процедуры заключается в выделении базовой станцией (БС) поднесущих каждого доступного частотно-временного блока АС, для которых достигается наибольшее значение некоторой метрики (целевой функции) на данной группе поднесущих. В качестве такой метрики может выступать значения отношения мощности сигнала к мощности помехи и шума (ОСПШ) в канале для i -й

АС, отношение мгновенной скорости передачи данных i -й АС к средней пропускной способности, рассчитанное для некоторого временного интервала.

Для повышения спектральной эффективности MIMO-OFDMA системы связи один и тот же частотно-временной блок может использоваться для обслуживания нескольких АС. В этом случае между сигналами АС появляются взаимные помехи.

В данном случае диспетчер контролирует, для каждого момента времени, каким АС нужно распределить части совместно используемого ресурса. Диспетчер также определяет скорость передачи данных, которая должна применяться для каждой АС. Диспетчер определяет производительность всей системы, особенно в очень загруженной сети. Как нисходящая, так восходящая линии связи 5G-NR подвергаются плотному (компактному) планированию [24]. Диспетчер для каждого временного момента и частотной области выбирает АС с наилучшим состоянием канала, как показано на рис. 2.

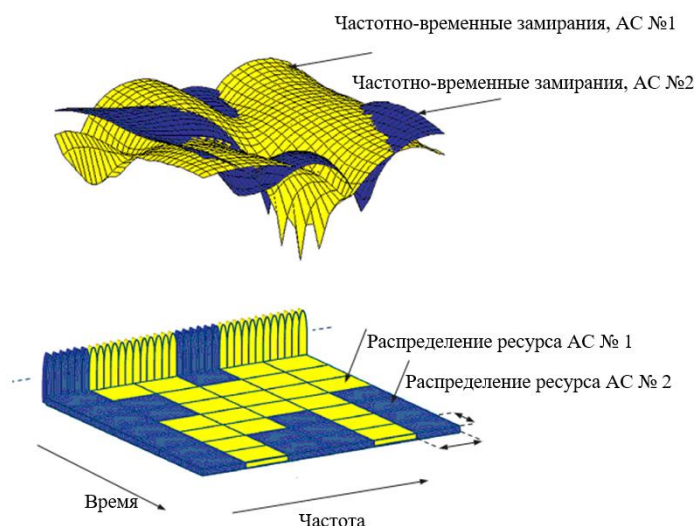


Рис. 2. Распределение ресурсов между АС

Для решения вопроса о нарушении условий электромагнитной совместимости необходимо установить характер влияния помех и оценить результаты этого влияния на качество функционирования радиоэлектронных средств (РЭС) в рассматриваемой группировке. Выбор конкретной модели определяется методом анализа, требованиями к его точности, свойствами и достоверностью исходных данных. Например, при высокой степени взаимодействия элементов в группировке РЭС наступает неравновесное состояние системы, что приводит к потере ее устойчивости. С точки зрения радиофизического тракта такое состояние может наступить при множественном помеховом воздействии в группировке РЭС систем мобильной связи и в том числе в условиях неоптимального распределения частотного ресурса.

Анализ ЭМС в группировке радиоэлектронных средств базируется на результатах исследования электромагнитной обстановки и параметров, влияющих на ЭМС на качественном и

количественном уровнях. Поэтому целесообразно нахождения уровней предельных множественных воздействий, при которых наступает неравновесное состояние группировки РЭС системы мобильной связи, при котором становится невозможным функционирование системы по показателям качества.

В связи с этим актуальной задачей является разработка математической модели взаимодействий и фазовых состояний при распределении частотного ресурса в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G при групповом использовании частотного ресурса, основанная на динамической модели множественных взаимодействий n -элементов сложной системы.

Разработка такой модели позволит основательно проводить анализ группировки РЭС мобильных систем связи 5G при решении задачи оптимального распределения частотного ресурса группировки радиоэлектронных средств в условиях нелинейных электромагнитных воздействий.

Анализ взаимодействия РЭС NR и их ЭМС можно представить в виде теоретико-игровой модели. Игра – это математическая модель коллективного поведения: несколько участников влияют на ситуацию, причем их интересы (выигрыши или потери при различных возможных ситуациях) различны. При таком представлении во взаимодействии динамических систем возможны три характерные стратегии поведения. В применении к процессу электромагнитных взаимодействий между РЭС NR эти стратегии могут быть классифицированы следующим образом:

1) антагонистическая стратегия, когда участники имеют противоположные интересы. Она применима в случае создания преднамеренных помех. Эта стратегия не характерна для проблематики ЭМС;

2) кооперативная стратегия, когда у всех игроков есть общая цель и их стратегии согласованы. Данная стратегия наиболее благоприятна в сложной СПО, поскольку она предполагает наличие управляемых элементов, формирующих ЭМО, т.е. управление всей системой в целом;

3) стратегия равнодушия или игра с природой, когда стратегия j -го игрока не зависит от стратегии i -го игрока. Данная стратегия – поиск свободного ресурса, она характерна при децентрализованных методах управления элементами связи.

Известны и другие типы стратегий, которые используются в задачах ЭМС – чистые или смешанные. Игра в чистых стратегиях предполагает детерминистский подход, и как следует из теории игр, редко когда приводит к равновесным решениям. В противоположность этому, для игр в смешанных стратегиях, при стохастическом подходе круг равновесных решений значительно расширяется.

Решение задачи коллективом игроков сводится к выбору стратегии и к задаче многокритериальной оптимизации. При небольших отклонениях в информации об априорных данных поведение системы можно представить моделью взаимодействий и фазовых состояний группировок излучающих элементов.

Целью исследования является разработка динамической модели множественных взаимодействий n -элементов сложной системы мобильной связи 5G, в которой учтены характер межэлементных связей и фазовых состояний при групповом использовании частотных ресурсов.

Материалы и методы

В группировке РЭС NR основные параметры самих средств $\vec{x}(t)$ обычно известны, детерминированы. Состояние же всей группировки – случайно. Это объясняется влиянием множества неопределенных, случайных условий, формируемых характеристиками распространения радиоволн (РРВ). В результате случайных взаимодействий $s_{ij}(t)$,

$i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, где n – число РЭС, в самих параметрах РЭС происходят изменения. В группировке РЭС имеются соответствующие динамические взаимодействия, которые проявляются в результате измерений и наблюдений и характеризуются вектором распределения частотного ресурса $\vec{y}(t)$. Динамика изменений параметров описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = F(t)\vec{x}(t) + B(t)\vec{u}(t) + G(t)\vec{\xi}(t), \quad (1)$$

где $\vec{x}(t)$ – вектор состояний, $F(t)$ – матрица состояния, $\vec{u}(t)$ – вектор управления, $B(t)$ – матрица управления, $\vec{\xi}(t)$ – случайные возмущения, $G(t)$ – матрица случайных входных возмущений.

Или в более общем случае

$$\frac{d\vec{x}(t)}{dt} = f[\vec{x}(t), \vec{y}(t)]. \quad (2)$$

Успешность решения задачи электромагнитной совместимости рассматриваемой группировки зависит от наличных ресурсов $g_m = g_m(\vec{x}(t), t)$, $m \in \overline{1, M}$, а также от известных априорных вероятностей распределения p_i , $i \in \overline{1, n}$ и параметров c_{ijm} , определяющих характеристики связи между i -м и j -м РЭС и m -м ресурсом.

Наличные ресурсы g_m определяются суммой частотно-территориальных, временных, поляризационных, энергетических и других параметров РЭС и линий связи. Их можно представить в виде:

$$g_m(\vec{x}(t), t) = \sum_{i,j=1}^n c_{ijm} s_{ij}. \quad (3)$$

В системе группировки РЭС в процессе ее функционирования реализуется соответствующее перераспределение ресурсов $\vec{y}(t)$, определяемое моделями стационарных состояний, которые описываются задачами максимизации энтропии системы [25]

$$H(y) = \sum_{i=1}^n p_i \ln \frac{y_i}{p_i} \rightarrow \max. \quad (4)$$

при соответствующих ограничениях на ресурсы.

Динамика состояния распределительного процесса определяется решением $\vec{y}(t)$ задачи (2), которое, как следует из (3) и (4), зависит от ее параметров p_i , c_{ijm} и g_m .

Таким образом, модель динамики неравновесных состояний NR приобретает следующий вид:

$$\vec{y}(x(t), t) = \arg \max \left[H(y) \mid g_k(x(t), t) \right].$$

Рассмотрим структурную схему макросистемы, образованную группировкой РЭС (рис.3). Электромагнитные взаимодействия $s_{ij}(t)$ происходят между элементами $x_i(t)$ и $x_j(t)$, соответственно: источниками и рецепторами.

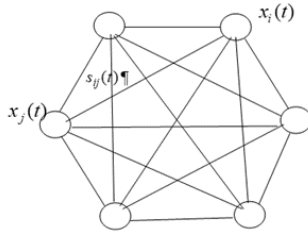


Рис. 3. Структурная схема взаимодействий s_{ij} в NR

Взаимодействующие связи между элементами определяются матрицами $C_m = [c_{ijm}; i, j \in \overline{1, n}]$, которые состоят из 0 и 1 и определяют наличие или отсутствие такой связи.

Очевидно, в такой неравновесной системе отмечается 2 основных процесса (потока): восстановления и распределения. Такой процесс мы наблюдаем в системах мобильной связи, когда абонентские станции (АС) потребляют и освобождают ресурс базовых станций (БС), т.е. происходит распределение и восстановление ресурса NR.

Обозначим через $\Phi[x(t), y(t)]$ поток восстановления и через $Q[x(t), y(t)]$ поток распределения. Эти потоки зависят от состояния $x(t)$ – процесса восстановления и состояния $y(t)$ – процесса распределения.

В рамках предположений о том, что время восстановления на много больше времени распределения [25], можно записать следующую, в общем случае нелинейную систему уравнений:

$$\frac{d \vec{x}(t)}{dt} = \Phi[\vec{x}(t), \vec{y}(x(t), t)], \quad (5)$$

$$\varepsilon \frac{d \vec{y}(t)}{dt} = Q[\vec{x}(t), \vec{y}(x(t), t)], \quad (6)$$

где ε – диагональная матрица малых параметров, определяющая интенсивность радиоэлектронных взаимодействий в рассматриваемой системе.

Формирование модели вида (6) для распределительного процесса с ограничениями и разнотипными ресурсами пока остается нерешенной задачей [25]. Такую модель удалось построить лишь для тех случаев, когда динамика распределительного

процесса – марковская, для ограничений балансового типа. В рассматриваемом случае можно предположить, что динамика распределительного процесса – марковская [25], поскольку не имеет значения, когда и как NR перешла в текущее состояние, а существенно лишь то, какой ресурс система использует на данный момент времени – частотный, поляризационный, временной или пространственный.

Проанализируем динамику состояния группировки РЭС NR. Для этого необходимо описать структуру ресурсов и их распределение между РЭС. Будем рассматривать группировку РЭС, состоящую из множества передатчиков и приемников. Все они являются потребителями ресурса. Если потребители ресурса состоят из n РЭС, то количество ресурса B является функцией численности РЭС $B = B(y_1, \dots, y_n)$. При отсутствии потребителей ($y_1 = \dots = y_n = 0$) имеем максимальный ресурс $B(0)$. При очень большом их количестве ($y_1 \rightarrow \infty, \dots, y_n \rightarrow \infty$) ресурс стремится к нулю $B(\infty) = 0$.

Для этого распределительного процесса можно указать некоторую априорную характеристику. Для каждого типа РЭС обычно известно нормативное количество ресурса a_i . Определим величину

$$p_i = \frac{a_i y_i}{\sum_{i=1}^n a_i y_i}; \quad p_i = \frac{a_i y_i}{\sum_{l=1}^n a_l y_l}; \quad 0 \leq p_i \leq 1; \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (7)$$

Тогда процесс случайного распределения ресурса по типам РЭС эквивалентен случайному и независимому распределению m каналов по n РЭС с априорной вероятностью распределения $P = \{p_1, \dots, p_n\}$.

Подставив выражение (8) в (6), получим нелинейную систему Вольтерра, распределения частотного ресурса в группировке РЭС:

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = p_i y_i(t) (\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s p_j y_j). \quad (8)$$

Преобразует данное дифференциальное выражение к разностному. Обозначим t_k – дискретное время.

$$\frac{dy_i(t_{k+1}) - dy_i(t_k)}{t_{k+1} - t_k} = p_i y_i(t_k) (\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(t_k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(t_k) p_j y_j(t_k)) \quad (9)$$

где $t_{k+1} - t_k = T_d$ – интервал дискретизации, время предоставления частотного ресурса относительно времени наблюдения. Обозначив дискретное время $t_k = k$ получим разностное уравнение:

$$y_i(k+1) = T_d y_i(k) + T_d [p_i y_i(k)(\varepsilon_i - \sum_{s=1}^n p_s y_s(k) - \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^n p_s y_s(k) p_j y_j(k))] \quad (10)$$

Данная модель позволяет выполнять анализ при различных конкретных параметрах и электромагнитных взаимодействиях.

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера рассмотрим динамику состояния двух РЭС NR ($n=2$) при различных значениях ε , учитывающих интенсивность взаимодействия РЭС. Формализация данного показателя носит самостоятельный характер и решается в зависимости от решаемой задачи. В показатель интенсивности взаимодействия может входить рост численности РЭС, частотно-энергетический ресурс, потребляемый одним типом РЭС, адаптируемость сети к сигнально-помеховой обстановке и др., а определение данного показателя является задачей многокритериальной оптимизации.

Частотно-энергетический ресурс на начальный момент составляет: $y_1(k=0) = 0,0833$ ресурсного блока – для первого РЭС и $y_2(k=0) = 0,1667$ – для второго РЭС. Априорные вероятности $v_1 = 0,3024$ $v_2 = 0,6976$. Интервал дискретизации $T_d = 1$.

На рис. 4 показано перераспределение частотно-энергетического ресурса во времени при одинаковой интенсивности взаимодействия РЭС, а именно $\varepsilon_1 = 0,5$; $\varepsilon_2 = 0,5$. Номера кривых соответствуют номеру сети. Как видно из рис. 2 при малых и одинаковых значениях ε зависимость перераспределения ресурса между РЭС практически линейно возрастает во времени и при дальнейшем рост прекращается. Различие состоит в начальном используемом ресурсе и в априорной вероятности распределения. Такая тенденция, очевидно, характерна для сосуществования двух РЭС при неантагонистическом характере их функционирования.

При значениях $\varepsilon_1 = 1,35$, $\varepsilon_2 = 1,3$ (рис. 5) отмечается 3 характерные области графиков. Начальная область, где отмечается плавное увеличение потребляемого ресурса как для одного РЭС, так и для другого. При этом для первого РЭС потребляемый ресурс увеличивается медленнее по сравнению со вторым за счет меньшего начального значения частотного ресурса. Вторая область – стационарная, равновесная часть. Далее наблюдается увеличение потребления ресурса первым РЭС за счет большего показателя ε_1 по сравнению с ε_2 и спад потребления ресурса вторым РЭС, вследствие подавления его первым РЭС.

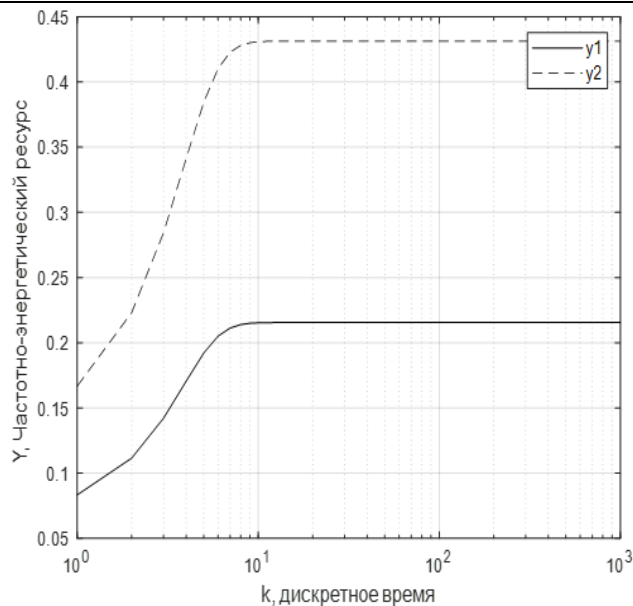


Рис. 4. Зависимость распределения частотного ресурса при слабой интенсивности взаимодействий

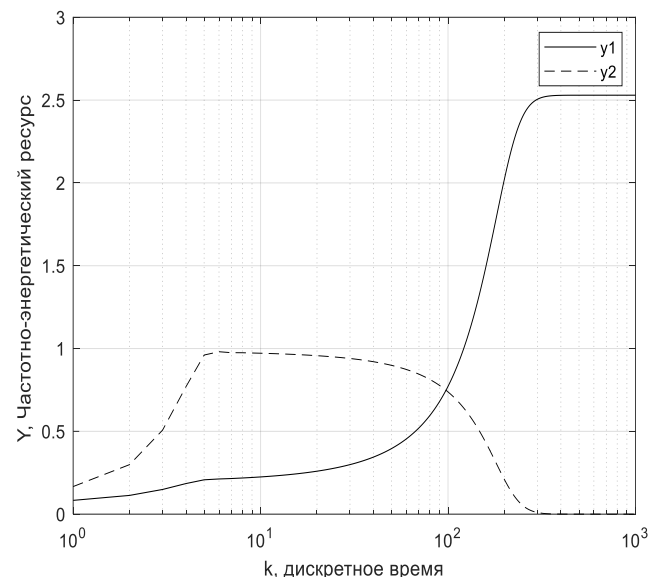


Рис. 5. Зависимость распределения частотного ресурса при средней интенсивности взаимодействий

При значениях $\varepsilon_1 = 1,6$; $\varepsilon_2 = 1,6$; (рис. 6) отмечаются 2 области. Начальная область, с ростом увеличения потребляемого ресурса (переходной режим), затем наблюдаются скачкообразные изменения потребления ресурса, связанные с достижением критических значений по насыщению системы, с ограничением наличного ресурса. Можно сказать, что система в данном случае имеет неустойчивый режим работы.

Как видно из приведенных рисунков перераспределение ресурсов в значительной мере зависит от параметра интенсивности взаимодействий РЭС. Проведен анализ и построена зависимость распределения ресурсов в установившемся режиме от параметра интенсивности ε (рис. 7).

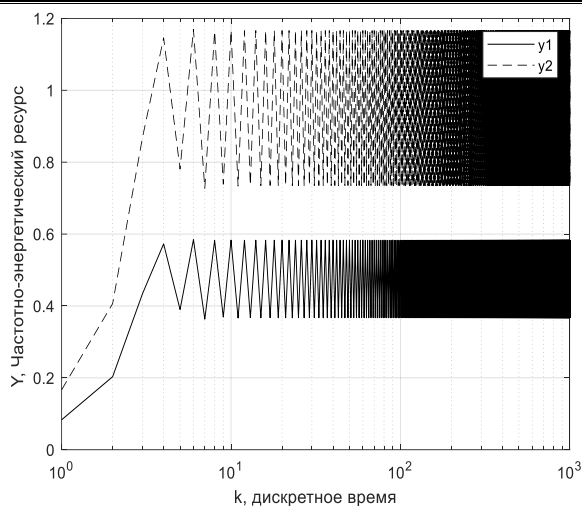


Рис. 6. Зависимость распределения ресурсов при критической интенсивности взаимодействий

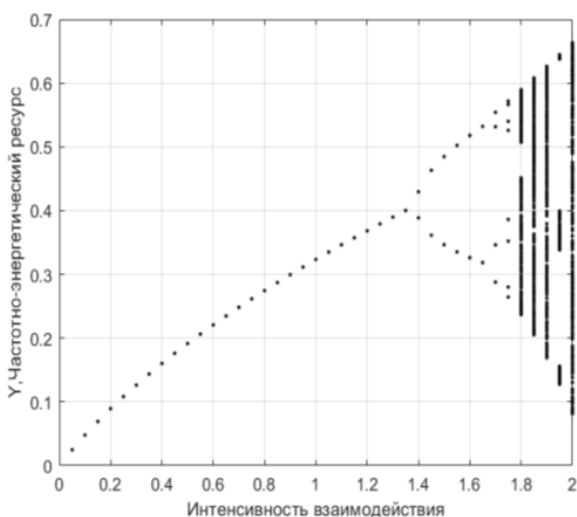


Рис. 7. Фазовый портрет. Зависимость распределения ресурсов Y от интенсивности взаимодействий ε при интервале дискретизации $T_d = 1$

Как видно из приведенного графика, критическим числом ε , при котором система еще не теряет устойчивости, является $\varepsilon \cong 1,4$. Из графика (рис. 7) следует, что в области $\varepsilon > 1,4$ наступают раздвоения траекторий (бифуркация состояния).

Очевидно, в области $\varepsilon \geq 1,4$ изменения состояния наблюдаемой системы могут оказаться значительными и неоднозначными при незначительных входных воздействиях. Такое состояние в теории управления трактуется как неустойчивое [25].

Устойчивость в данном случае понимается в классическом варианте: чтобы малые изменения управляющих параметров в области $\varepsilon < 1,4$ не приводили бы к большим изменениям состояния системы.

Получен фазовый портрет при интервале дискретизации $T_d = 2$ (рис. 8) и с теми же исходными

данными, что и для предыдущего примера.

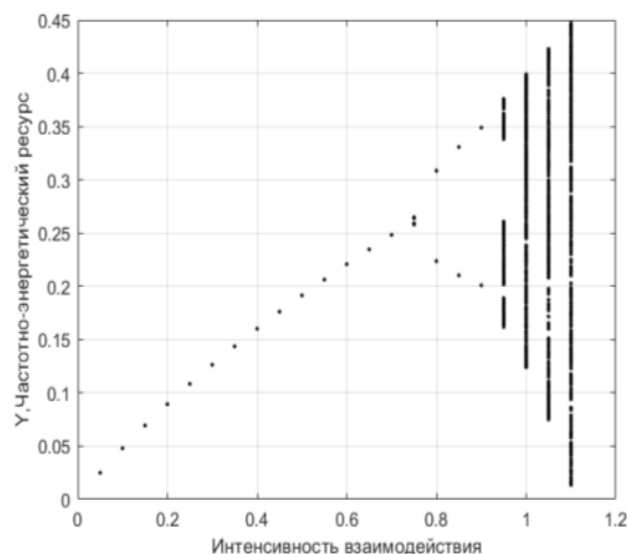


Рис. 8. Фазовый портрет. Зависимость распределения ресурсов Y от интенсивности взаимодействий ε при интервале дискретизации $T_d = 2$

Как видно из рис.8 бифуркация траекторий наблюдается в области $\varepsilon \approx 0,75$, т.е. при гораздо меньших интенсивностях взаимодействий.

Аналогичное неустойчивое поведение может наступить и в равновесной системе (1), когда при добавлении незначительного количества радиосредств в группировку РЭС такое равновесное состояние уже не наступает.

Близкие по состоянию неравновесные условия могут возникать и в других системах связи, с которыми взаимодействуют мобильные системы связи. Так попытка внедрения методов динамической маршрутизации привела к появлению проблемы "биения маршрутов"; в САРД, функционирующих по протоколу IEEE 802.11a возникают "взрывы фрагментов", когда из-за нерационального выбора параметров система загружается повторными передачами фрагментов.

Выводы

Рассмотрена модель динамики неравновесных состояний при анализе электромагнитных взаимодействиях в группировке радиоэлектронных средств сети мобильной связи 5G. На конкретном примере было показано, как с помощью нелинейной системы уравнений, моделирующей динамику взаимодействий группировки РЭС, можно анализировать ее состояние в будущем. Данная модель позволяет выполнять анализ при различных, конкретных параметрах отдельных типов РЭС, их взаимодействий и распределения ресурсов. Данные исследования позволяют дать рекомендации при планировании, проектировании, частотно-территориальном планировании и эксплуатации сетей мобильной связи.

References

1. 3GPP TR 22.891, "Feasibility Study on New Services and Markets Technology Enablers," Ver. 14.2.0, Sep. 2016.
2. 3GPP TR 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies," Ver. 14.3.0, June 2017.
3. 3GPP TS 28.554. Management and orchestration; 5G end to end Key Performance Indicators (KPI). Ver. 2.0.0, release 15, September 2018.
4. 5G PPP Architecture Working Group white paper, "View on 5G Architecture", July 2016.
5. Abuarqoub, A., Hammoudeh, M. H. (2016), "Behaviour Profiling in Healthcare Applications Using the Internet of Things Technology", *Proceedings of Fourth International Conference on Advances in Information Processing and Communication Technology*, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-25>
6. Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N. (2016), "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, No. 18 (3), P. 1617–1655. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458>
7. Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A. H., Friderikos, V., Frodigh, M. (2017), "Realizing the Tactile Internet: Haptic Communications over Next Generation 5G Cellular Networks", *IEEE Wireless Comm*, No. 24 (2), P. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.1500157RP>
8. Aijaz, A., Simsek, M., Dohler M., Fettweis, G (2017), "Shaping 5G for the Tactile Internet", *5G Mobile Communications*, Springer International Publishing, P. 677–691. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-34208-5_25
9. Aijaz, A. (2016), "Towards 5G-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications", *In Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Doha, Qatar, 3-6 April 2016, P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2016.7564661>
10. Raza, U., Kulkarni, P., Sooriyabandara, M. (2017), "Low Power Wide Area Networks: An Overview", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 19, P. 855–873. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
11. (2016), *Radio Regulations*, Ed. ITU, in 4 volumes.
12. Resolution COM 6/20 (WRC-15) Studies on frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond.
13. Mokrov, E., Ponomarenko-Timofeev, A., Gudkova, I., et al. (2018), "Modeling Transmit Power Reduction for a Typical Cell with Licensed Shared Access Capabilities", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2799141>
14. Markova, E., Gudkova, I., Ometov, A., et al. (2017), "Flexible Spectrum Management in a Smart City within Licensed Shared Access Framework", *IEEE Access*, Vol. 5, P. 22252–22261. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758840>
15. Talwar, S., Choudhury, D., Dimou, K., et al. (2014), "Enabling technologies and architectures for 5G wireless", *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Tampa, FL, USA, P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2014.6848639>
16. Kurakova, T., Valdburger, M. (2013), "How ITU can help develop future networks", *ITU News*, No. 1, P. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.1525/aft.2013.41.3.38>
17. Galinina, O., Andreev, S., Komarov, M., et al. (2017), "Leveraging heterogeneous device connectivity in a converged 5G-IoT ecosystem", *Computer Networks*, Vol. 128, P. 123–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.04.051>
18. Kremenetska Ya. A., Markov S. Yu., Gradoboeva N. V., Kharchenko Ye. M. (2019), "Analysis of limiting and compensating factors when calculating the energy efficiency of radio systems in the millimeter range", *Telecommunication and Information Technologies*, No. 1, P. 12–21. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2019.011221>
19. 3GPP TS 38.104. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.
20. 3GPP TS 38.211. NR; Physical channels and modulation.
21. 3GPP TS 38.212. NR; Multiplexing and channel coding.
22. 3GPP TS 38.213. NR; Physical layer procedures for control.
23. 3GPP TS 38.300. NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2.
24. Yan, M., Feng, G., Zhou, J., Sun, Y., Liang, Y. -C. (2019), "Intelligent Resource Scheduling for 5G Radio Access Network Slicing", *in IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 8, P. 7691-7703. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2922668>
25. Koliadenko, Yu., Glushko, A., Voronin, O. (2018), "A mathematical model of attacks and defenses in Software-Defined Networks", *Problemi telekomunikacij*, No. 1 (22), P. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/pt.2018.1.04>

Надійшла (Received) 14.06.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сєліванов Костянтин Олександрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, здобувач кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна, email: sunright@yandex.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1631-9986>.

Сєліванов Константин Александрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, соискатель кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Selivanov Konstantyn – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Муляр Богдан Петрович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: bohdan.muliar@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1631-9986>.

Муляр Богдан Петрович – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Muliar Bohdan – Kharkiv National University of Radio Electronics, Postgraduate V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Коляденко Юлія Юрійвна – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна; email: yuliia.koliadenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0247-2736>.

Коляденко Юлия Юрьевна – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Kolyadenko Yulia – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Москалець Микола Вадимович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В. В. Поповського, Харків, Україна, email: mykola.moskalets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1726-1250>.

Москалец Николай Вадимович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры инфокоммуникационной инженерии имени В. В. Поповского, Харьков, Украина.

Moskalets Mykola – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of V. V. Popovskyy Department of Infocommunication Engineering, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЙ І ФАЗОВИХ СТАНІВ ПРИ РОЗПОДІЛІ ЧАСТОТНОГО РЕСУРСУ В УГРУПОВАННІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 5G

Предмет: моделі взаємодії і фазові стани при розподілі частотного ресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G. **Мета:** розробка динамічної моделі множинних взаємодій n -елементів складної системи мобільного зв'язку 5G, в якій враховані характер межелементних зв'язків і фазових станів при груповому використанні частотного ресурсу. **Задачі:** на основі складної моделі n -елементної системи з множинними взаємодіями розробити математичну модель опису електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів в просторі станів при груповому використанні частотного ресурсу; провести аналіз фазових станів взаємодії елементів системи угруповання радіоелектронних засобів системи мобільного зв'язку при яких вони зможуть функціонувати без погіршення якісних показників, які відображають сумарний рівень групового впливу випромінюючих елементів на приймальні пристрої, в умовах оптимального розподілу частотного ресурсу. **Методи:** математичний метод простору станів системи, яка описує нелінійний характер і фазові стани системи з урахуванням інтенсивності взаємодії її елементів. **Результати:** Розроблено математичну модель електромагнітної обстановки угруповання радіоелектронних засобів, що характеризує нелінійний характер взаємодій при груповому використанні частотного ресурсу. Отримано рекуррентне вираження для моделювання оцінки сукупного характеру електромагнітних взаємодій в угрупованні радіоелектронних засобів. Проведено моделювання динаміки взаємодії та фазових станів угруповання радіоелектронних засобів при груповому використанні частотного ресурсу. **Висновки:** показано, що за допомогою моделі, що моделює динаміку взаємодій угруповання РЕЗ, можна аналізувати її стан в майбутньому. Дана модель дозволяє виконувати аналіз угруповання радіоелектронних засобів при різних, конкретних параметрах окремих типів РЕЗ, характер і інтенсивності їх взаємодій в угрупованні при чинному розподілі ресурсів.

Ключові слова: динамічна модель; множинні взаємодії; електромагнітна обстановка; розподіл ресурсів; розподіл частот.

MODEL OF INTERACTIONS AND PHASE STATES IN THE DISTRIBUTION OF THE FREQUENCY RESOURCE IN THE GROUPING OF RADIO ELECTRONIC MEANS OF A 5G MOBILE COMMUNICATION NETWORK

Subject: interaction models and phase states in the distribution of the frequency resource in the grouping of radio electronic means of the 5G mobile communication network. **Purpose:** development of a dynamic model of multiple interactions of n -elements of a complex 5G mobile communication system, which takes into account the nature of inter-element connections and phase states in the group use of the frequency resource. **Tasks:** on the basis of a complex model of an n -element system with multiple interactions, to develop a mathematical model for describing the electromagnetic environment of a grouping of radio electronic means in a state space with a group use of a frequency resource; to analyze the phase states of interaction of the elements of the grouping system of radio-electronic means of the mobile communication system in which they can function without deteriorating the quality indicators, which reflect the total level of the group influence of the emitting elements on the receiving devices, under conditions of optimal distribution of the frequency resource. **Methods:** mathematical method of the state space of the system, which describes the nonlinear nature and phase states of the system, taking into account the intensity of the interaction of its elements. **Results:** A mathematical model of the electromagnetic environment of a grouping of radio-electronic devices based on the Volterra model has been developed, which characterizes their nonlinear nature of interactions in the group use of the frequency resource. A recurrent expression is obtained for modeling the assessment of the aggregate nature of electromagnetic interactions in a group of radio-electronic means. Modeling of the dynamics of interaction and phase states of the grouping of radioelectronic devices in the group use of the frequency resource has been carried out. **Conclusions:** It is shown that using a model that simulates the dynamics of interactions of a group of radioelectronic, it is possible to analyze its state in the future. This model makes it possible to analyze the grouping of radio-electronic means with different, specific parameters of individual types of radio electronic devices, the nature and intensity of their interaction in the grouping with the current distribution of resources.

Keywords: dynamic model; multiple interactions; electromagnetic environment; resource allocation; frequency allocation.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Селіванов К. О., Муляр Б. П., Коляденко Ю. Ю., Москалець М. В. Модель взаємодій і фазових станів при розподілі частотного ресурсу в угрупованні радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 2 (16). С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>

Sielivanov, K., Muliar, B., Kolyadenko, Yu., Moskalets, M. (2021), "Model of interactions and phase states in the distribution of the frequency resource in the grouping of radio electronic means of a 5G mobile communication network", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.089>