УДК 654.16:621.391.82

Е. В. ГАЛУНЕНКО

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ГРУППИРОВОК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ КООПЕРАТИВНЫХ ИГР

Постановка задачи

В настоящее время стремительно развиваются телекоммуникационные технологии, увеличивается количество услуг связи и их потребителей. Особенно это развитие заметно в системах подвижной связи (СПС). С каждым годом количество операторов подвижной связи, как в Украине, так и в зарубежных странах, растет. С появлением СПС сигнально-помеховая обстановка (СПО) в диапазонах метровых и дециметровых волн стала резко усложняться. Все возрастающее количество радиоэлектронных средств (РЭС) различного предназначения приводят к образованию множественного характера радиоэлектронных взаимодействий между ними. К СПС относятся не только ставшие уже традиционными системы сотовой связи, но и системы транкинговой, пейджинговой связи, системы абонентского радиодоступа (САРД). При этом САРД интенсивно развиваются, особенно в технологиях Wi-Fi и Wi-Max. Развиваются также системы радиорелейной, спутниковой и другой радиосвязи. Одновременно с этим возникает дефицит частотного ресурса, обостряется проблема электромагнитной совместимости (ЭМС).

Электромагнитная совместимость элементов системы внутри одной беспроводной сети обеспечивается тем или иным стандартом.

Так, в стандарте 802.15 (Bluetooth) предусмотрена работа в одной пикосети не более 8 Bluetooth-устройств, осуществляющих передачу сигналов с использованием временного дуплекса и механизма "частотных прыжков" в соответствии с законом выбранной псевдослучайной последовательности.

Стандартом 802.11 исключена ситуация внутрисистемного влияния, поскольку осуществляется управляемый доступ терминалов к среде передачи, когда передача данных между абонентскими терминалами и точкой доступа (либо между группировкой абонентских терминалов) происходит последовательно, либо доступ с прослушиванием несущей и избежанием конфликтов.

Стандарт цифровой расширенной беспроводной связи DECT построен на базе частотного и временного доступа.

В стандарте 802.16 передача информации между базовой станцией (БС) и абонентским терминалом (АТ) организована с использованием комбинации частотного, временного дуплекса и частотного, временного разделения каналов.

Однако помехи, как внутрисистемные, так и межсистемные все же возникают. Электромагнитную обстановку усложняет то, что в эту обстановку вносятся различные случайные факторы, носящие трудно прогнозируемый характер. В этих условиях рассчитать заранее ЭМО и решить задачу ЭМС с достаточной точностью не всегда удается из-за априорной неопределенности.

Все это не позволяет непосредственно использовать классические методы и методики обеспечения ЭМС в группировках этих систем, которые построены, как правило, на рассмотрении дуэльных ситуаций, на предположении о стационарности взаимодействующих объектов.

Специфика ЭМС СПС состоит в том, что группировка РЭС образует динамическое множество, состав и электромагнитные взаимодействия которого определяются случайными законами. Данное обстоятельство позволяет использовать общую базовуюй модель в виде системы стохастических дифференциальных уравнений состояния:

$$d\vec{x}(t)/dt = f(\vec{x}(t),t) + b(\vec{x}(t),\vec{u}(t),t) + G(\vec{x}(t),\vec{n}(t),t), \tag{1}$$

где $\bar{x}(t)$ – i-мерный вектор состояния системы, $f(\bar{x}(t),t)$ – $[i \times i]$ вектор-функция состояния системы, определяющая ее инерционные свойства и взаимосвязи между i-компонентами, $b(\bar{x}(t),\bar{u}(t),t)$ – вектор-функция управления системой, $G(\bar{x}(t),n(t),t)$ – масштабирующая функция-множитель случайных воздействий в моделируемой системе, $\bar{n}(t)$ – гауссов белый шум (ГБШ), источник случайных воздействий. Наличие взаимосвязей между отдельными компонентами дифференциальной модели (1) позволяет трактовать ее как игровую модель с неантогонистическими стратегиями поведения.

В связи с этим описание поведения, анализ и прогноз ЭМС в группировках этих систем в терминах теории игр является актуальной научной задачей.

Основная часть

Анализ взаимодействия РЭС СПС и их ЭМС можно представить в виде теоретико-игровой модели [1, 2]. 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 S_i, $i=\overline{1,n}$ возможны три характерные стратегии поведения. В применении к процессу электромагнитных взаимодействий между РЭС СПС эти стратегии могут быть классифипированы 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 $\gamma_i = \overline{1,n}$ и, образующие вектор $\vec{S}$ 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.

На практике игроков может быть один или несколько. В случае, если игрок один, зада а проще: считается, что он выбирает из множества альтернатив ту, при которой достигается максимум его функций полезности. Если же игроков несколько, то и выигрыш или потери одного зависит от выбора каждого в отдельности [3]. Результат будет зависеть от того, насколько точно предскажет j-й игрок поведение i-го игрока .

При антагонистической стратегии поведения задача сводится к предсказанию решения игры – устойчивого в том или ином смысле исхода взаимодействия игроков. Анализ игр множества игроков существенно затруднен из-за сложности вопроса о механизмах формирования и действия коалиций. Моделирование коалиционных взаимодействий как антагонистических игр привело к так называемой теории кооперативных игр. Игра называется кооперативной (коалиционной), если игроки объединены в группы. Все игроки берут на себя некоторые обязательства перед другими и координирует свои действия. В играх такого типа используют так называемую характеристическую функцию, определяющую выигрыш каждой коалиции игроков. При этом предполагается, что выигрыш пустой коалиции равен нулю. Изучая нормальную форму для кооперативных игр, в своей книге фон Нейман и Моргенштерн рассудили, что если в игре с двумя сторонами образуется коалиция C, то против неё выступает коалиция $N \mid C$. Образуется как бы игра для двух игроков. Но так как вариантов возможных коалиций много (а именно 2^N, где N – количество игроков), то выигрыш для C будет некоторой характеристической величиной, зависящей от состава коалиции. Формально игра в такой форме представляется парой (N, v), где N – множество всех игроков, а $v: 2^N \to R$ – это характеристическая функция [4].

Множество игроков N. в соответствии с определением кооперативной игры, в совокупности обладает некоторым количеством определенного ресурса (в нашем случае частотного), который надлежит разделить между игроками (операторами связи). Принципы этого деления и называются решениями кооперативной игры. Решение может быть как однозначным (в этом случае для каждой игры решением является единственное распределение выигрышей). так и многозначным (когда для каждой игры могут быть определены несколько распределений). Примерами однозначных решений служат N-ядро и вектор Шепли.

Вектор Шепли является принципом оптимальности распределения выигрыша между игроками в задачах теории кооперативных игр и представляет собой распределение, в котором выигрыш каждого игрока равен его среднему вкладу в общий ресурс коалиции при определенном механизме ее формирования.

Допустим, что существует коалиционная игра с побочными платежами (в нашем случае побочными платежами будут помехи) $v:2^N \to R$, заданная своими частотами $v(K)$ для различных коалиций операторов связи $K(v(\varnothing)=0)$. В супермодулярных играх с каждым упорядочением игроков (операторов) τ связали некоторую полосу частот $x^\tau \in R^N$. Упорядочением (нумерацией) операторов связи называется биекция $\tau:\{1,...,n\} \to N$, а полосы частот x^τ распределены так, что оператор связи $\tau(i)$ с номером i получает определенную полосу частот $v(\tau\{1,...,i\})-v(\tau\{1,...,i-1\})$. Иначе говоря, игрок получает тот прирост, который он привносит своим присоединением к коалиции предшествующих ему игроков.

В случае выпуклых игр полосы частот x^τ принадлежали ядру игры v, и более того, образовывали крайние точки ядра. В частности, центр тяжести точек x^τ(т. е. точка $x^* = \left(\sum_\tau x^\tau\right)/n!$) также лежит в ядре и, в некотором смысле, является наиболее справедливым ядерным распределением частот. Идея Шепли в том, чтобы этой же формулой определить полосу частот для произвольных игр. Вектором, или значением Шепли игры v называется элемент $\Phi(v) \in R^N$, заданный формулой

$$\Phi(v) = \left(\sum_\tau x^\tau\right)/n! \qquad (2)$$

Интерпретировать формулу (2) можно так: случайным образом вводится новый оператор. В этом случае каждый оператор получает права на использование этой полосы, взамен он вносит платеж. Это позволит распределить частоты между операторами связи, что в свою очередь даст возможность уменьшить помехи. Средний платеж (будем считать, что вероятность каждого упорядочения равна $1/n!$, где n – число операторов связи) и есть соответствующая координата вектора Шепли.

Перепишем приведенную формулу, акцентируя внимание на значении $\Phi(v)$ для конкретного игрока i. Оператор связи i получает права на использование определенных частот $v(K)-v(K-i)$. Остается подсчитать, при скольких упорядочениях τ происходит это событие (т. е. что после ввода нового игрока i собирается полная коалиция K). Пусть i вводится k-м по очереди, где $k=|K|$. До него была коалиция $K'=K-i$ из $k-1$ игрока. Это даст $(k-1)!$ возможностей для входа в коалицию участников из K' до i. После входа i остаются ещё $(n-k)!$ возможностей для входа в коалицию остальных операторов связи, из $N-K$. Итак полное число возможностей равно $(k-1)!(n-k)!$. Получим следующую формулу для i-й координаты вектора Шепли:

$$\Phi(v)_i = \sum_{i\in K} \frac{(k-1)!(n-k)!}{n!}\left(v(K)-v(K-i)\right). \qquad (3)$$

где $k=|K|$. Здесь суммирование идет по коалициям K, содержащим оператора связи i. Однако можно суммировать и по всем коалициям K, так как если K не содержит i, то $K-\{i\}=K$, и этот член ничего не меняет.

Решение

Приведем модель распределения частотных диапазонов между операторами связи. В нашем примере каждый из них имеет определенные частотные диапазоны, которые приносят определенную прибыль. На границе зоны действий операторов из-за несогласованности происходят наложения частот, что приводит к значительным помехам. Создавая коалиции между собой, они увеличивают прибыль, так как работа идет согласовано и наложения частот не происходит.

На рис. 1 приведем пример распределения частотных диапазонов, которыми владеют операторы связи. Цифры в строке под линией означают номер игрока, который может входить в коалицию. Над каждым из них их диапазоны, которые они имеют до входа в коалицию. Каждый диапазон имеет свою ценность (вес). На границе диапазонов представлен выигрыш, который получит коалиция, если в неё войдут игроки с данными диапазонами.

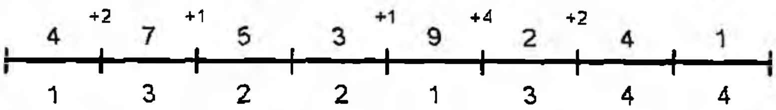

Рис. 1

Рассмотрим для примера коалицию из четырех игроков $K=\{1,2,3,4\}$. Обозначим ценности каждого из диапазонов частот, используемых игроками в данном примере. В соответствии с рис. 1 ценность первого диапазона равна четырем, ценность второго – семи, третьего – пяти, четвертого – трем, пятого – девяти, шестого – двум, седьмого – четырем, восьмого - одному. Первый игрок использует диапазоны первый и пятый, второй игрок – третий и четвертый, третий – второй и шестой, четвертый – седьмой и восьмой. Данные диапазоны до входа в коалицию игроков могут перекрываться и создавать помехи. При этом игроки до входа в коалицию имеют диапазоны весом $\nu(1)=4+9=13$, $\nu(2)=5+3=8$, $\nu(3)=7+2=9$ и $\nu(4)=4+1=5$. Создавая коалиции игроки получают выигрыши, так как урегулируют диапазоны частот таким образом, чтобы они не перекрывались и тем самым улучшалась ЭМО. Примем в качестве выигрышей следующие значения: на стыке первого и второго диапазонов, а также шестого и седьмого выигрыш равен двум, на стыке второго и третьего, а также четвертого и пятого – выигрыш равен 1, на стыке пятого и шестого – выигрыш равен 4.

Рассмотрим случаи, когда коалиции состоят из двух игроков. Тогда $\nu(12)=22$, $\nu(13)=28$, $\nu(14)=18$, $\nu(23)=18$, $\nu(24)=13$, $\nu(34)=16$. Если же в коалицию входят по трое участников, то $\nu(123)=38$, $\nu(124)=27$, $\nu(134)=35$, $\nu(234)=25$. В случае, если коалиция состоит из всех четырех участников, то выигрыш будет максимальным, т.е. мы суммируем все стоимости диапазонов и выигрыши, которые получили участники коалиции. $\nu(1234)=\nu(K)=45$. Далее, получив значения $\nu(K)$, можем подставить их в формулу (3). Для первого игрока

$$\Phi(\nu)_1=\frac{0!(4-0-1)!}{4!}(13-0)+\frac{1!(4-1-1)!}{4!}(22-8)+\frac{1!(4-1-1)!}{4!}(28-9)+\frac{1!(4-1-1)!}{4!}(18-5)+$$

$$+\frac{2!(4-2-1)!}{4!}(38-18)+\frac{2!(4-2-1)!}{4!}(27-13)+\frac{2!(4-2-1)!}{4!}(35-16)+\frac{3!(4-3-1)!}{4!}(45-25)=$$

$$=\frac{13}{4}+\frac{14}{12}+\frac{19}{12}+\frac{13}{12}+\frac{20}{12}+\frac{14}{12}+\frac{19}{12}+5=16\frac{1}{2}.$$

Аналогично проведем расчет для $\Phi(\nu)_2$, $\Phi(\nu)_3$ и $\Phi(\nu)_4$. Их значения будут соответственно равны 9, $13\frac{1}{2}$ и 6. Просуммировав все значения $\Phi(\nu)_i$, получим

$$\Phi(\nu)_i = 16\frac{1}{2}+9+13\frac{1}{2}+6=45=\nu(K)$$

На рис. 2, показана зависимость выигрыша от количества игроков в коалиции. Данные приведены с позиции игрока №1, который взаимодействует с остальными игроками. При взаимодействии первого игрока со вторым, выигрыш составит 22, при взаимодействии с третьим – 28, с четвертым – 18. Далее, если в коалицию первого и второго игрока входит третий, то выигрыш будет равен 38, в коалиции первого и третьего с появлением четвертого выигрыш будет равен 35, а в коалиции первого и второго игроков с входом в неё четвертого выигрыш – 27. Если рассматривать коалицию, например первого и третьего, в которую входит второй, то увидим, что значение выигрыша осталось 38, как и в коалиции первого и второго, в которую входит третий. Это показывает, что не имеет значение каким по счету входит игрок в коалицию – выигрыш остается таким же.

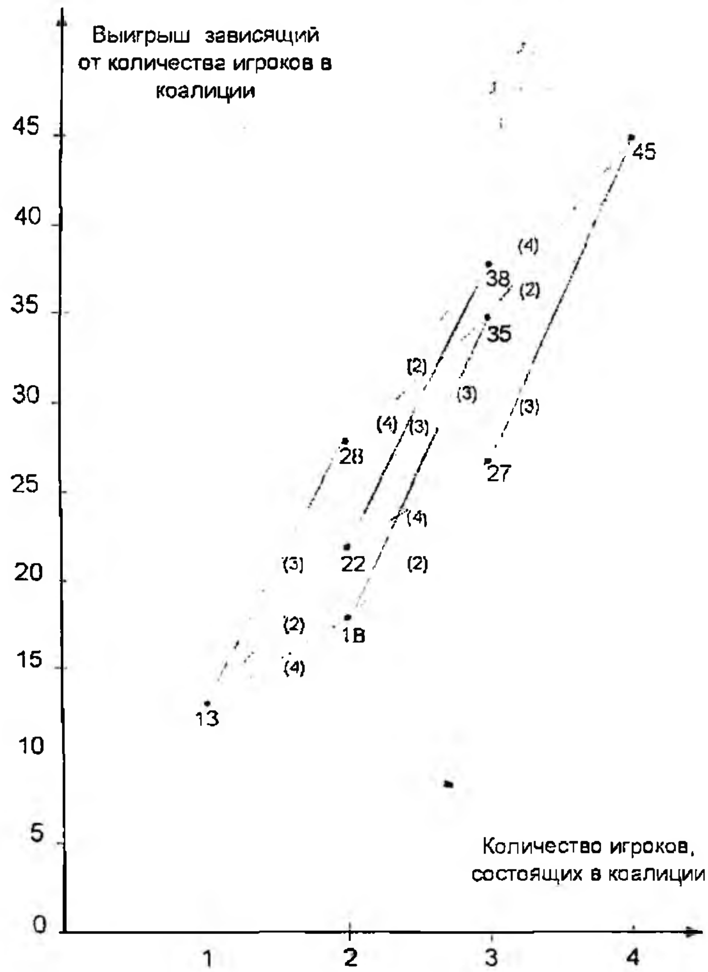

Рис. 2

Заключение

С каждым годом количество операторов подвижной связи как в Украине, так и в зарубежных странах растет. С появлением СПС сигнально-помеховая обстановка (СПО) в диапазонах метровых и дециметровых волн стала резко усложняться. Все возрастающее количество радиоэлектронных средств (РЭС) различного предназначения приводят к образованию множественного характера радиоэлектронных взаимодействий между ними.

Специфика ЭМС СПС состоит в том, что группировка РЭС образует динамическое множество, состав и электромагнитные взаимодействия которого определяются случайными законами. Данное обстоятельство позволяет использование общей базовой модели в виде системы стохастических дифференциальных уравнений состояния.

Наличие взаимосвязей между отдельными компонентами дифференциальной модели позволяет трактовать ее как игровую модель с неантогонистическими стратегиями поведения. Поэтому описание поведения, анализ и прогноз ЭМС в группировках этих систем предложено проводить на основании теоретико-игровой модели.

За основу была взята кооперативная (коалиционная) игра с однозначным решением - вектор Шепли. Расчет вектора Шепли был сделан на основе коалиционной игры, в которой принимали участие четыре игрока. Был учтен вклад каждого игрока и его выигрыш по отдельности в случае, если он принимал участие в игре. Анализ показал, что максимальный выигрыш возможно получить только в случае, если коалиция полная (т.е. состоит в нашем случае из четырех игроков). Это позволяет сделать вывод о том, что оптимизировать ЭМС и тем самым улучшить ЭМС возможно только в случае, если у операторов существует единая стратегия поведения.

Список литературы: 1. *Олейник В. Ф.* Методы коллективного принятия решений в задачах ЭМС систем подвижной связи // Праці КВІУС. 2002. №6. С. 28 - 81. 2. *Петросян Л. А., Кузютин Д. В.* Игры в развернутой форме: оптимальность и устойчивость. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. ун-та. 2000. 292 с. 3. *Чхартишвили А. Г.* Теоретико-игровые модели информационного управления. М.: ЗАО «ПМСОФТ», 2004. 227 с. 4. *Данилов В. И.* Лекции по теории игр / КЛ/2002/001. М.: Рос. экон. шк, 2002. 140 с.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 03.10.2008