УДК 621.391

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор
П. В. Караваев, аспирант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. В. Савельев, доктор технических наук, профессор
ОАО «Сарапульский радиозавод»

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ В ЦИФРОВОЙ РАДИОСИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОГО ПОДХОДА

Приведены основные типы конфликтов, возникающих в радиотехнических информационных системах. Получен алгоритм преодоления конфликтных ситуаций в процессе оптимального управления ресурсами радиосистемы.

Ключевые слова: система радиосвязи, конфликт, теория игр, функция выигрыша, оптимальная стратегия, управление ресурсами.

К современным радиотехническим системам предъявляются всевозрастающие требования по оптимальному использованию ресурсов. Это связано с большим количеством реализуемых функций, требующих соответствующих затрат как энергетических, так и информационных. Вопросы управления ресурсами радиосистем рассматривались в работах [1, 2]. В настоящей статье предлагается алгоритм управления ресурсами при условии возникновения конфликтов между различными параметрами радиосистемы. Некоторые типы конфликтов, возникающих в радиотехнических информационных системах, и пути их преодоления представлены в таблице.

№	Тип конфликта	Пути преодоления
1	Скорость – точность	Оптимизация инерционности системы
2	Ложная тревога – пропуск сигнала	Оптимизация порога принятия решения, автоматическая регулировка усиления
3	Дальность – качество связи	Увеличение мощности передатчика, высокий подвес антенны
4	Подвижность абонента – качество связи	Оптимальный выбор канала
5	Весогабаритные характеристики – функциональные возможности	Совершенствование элементной базы, разработка более эффективных алгоритмов
6	Качество связи – ограниченность энергоресурсов	Минимизация энергопотребления
7	Качество – стоимость	Снижение затрат на производство

Приведенный перечень не является полным. Однако он позволяет выявить некоторые общие тенденции в преодолении конфликтов. Они сводятся к поиску компромисса или определению приоритетов. Приоритеты устанавливаются исходя из целей и задач, решаемых системой. Часто принятое решение о приоритете носит субъективный характер, так как эта задача не поддается формализации. Для целей моделирования в большей степени подходит путь поиска компромиссов для преодоления некоторых из конфликтов. Для решения таких задач существует математическая теория игр [3]. Модели на основе уравнения состояния позволяют получить оптимальный приемник по критерию максимума апостериорной вероятности, т. е. байесовский приемник.

Для того чтобы убедиться в справедливости использования теоретико-игрового подхода, необходимо установить связь между потерями игрового и байесовского приемников. В [4] показано, что потери игрового и байесовского приемников при игровой помехе одинаковы. Из этого следует, что любой игровой приемник – байесовский при игровой помехе. Однако не всякий байесовский приемник при этой помехе игровой.

Если справедливо последнее утверждение, то, очевидно, справедлив и теоретико-игровой подход в сочетании с методом уравнения состояния при моделировании системы передачи информации в конфликтных ситуациях.

Рассмотрим цифровую систему передачи информации по радиоканалу. Пусть для повышения эффективности использования систем в ней предусматривается адаптация по нескольким параметрам. Например, в зависимости от помеховой обстановки система может менять частоту, либо скорость передачи информации. На систему воздействует как шум, так и организованная помеха. Будем рассматривать конфликт между участниками связи, стремящимися с максимальной достоверностью и с наибольшей скоростью передать информацию, и источником помех, как естественных (шум), так и организованных.

Цель разрешения этого конфликта заключается в том, чтобы выбрать оптимальный режим связи. Выбор оптимального решения сводится к формированию управляющего воздействия, которое переведет систему в этот режим.

Пусть в системе передачи информации используется цифровой сигнал с фиксированной длиной блока. Множество допустимых комбинаций образует группу над полем Галуа $GF(2)$. Предположим, что вектор состояния системы имеет длину $n = r + m$, где r – длина информационного блока; m – длина блока управляющего воздействия.

Уравнение состояния запишем следующим образом:

$$\vec{X}_{k+1}(g) = A(k+1,k)\vec{x}_k(g) \oplus \Gamma(k+1,k)\vec{Z}_k(g), \quad (1)$$

где $\vec{X}_{k+1}(g)$ – вектор состояния размерностью n; $\vec{x}_k(g)$ – вектор сообщения; $\vec{Z}_k(g)$ – вектор управления; $A(k+1,k)$ – переходная матрица состояния; $\Gamma(k+1,k)$ – переходная матрица управления; $\oplus$ – групповая операция.

Переходная матрица управления $\Gamma(k+1,k)$ имеет размерность (m, n), где m – количество изменяемых параметров системы. Эта матрица формируется на основании разрешения многошаговой стохастической игры Γ< H, Z, W >, где H –матрица выигрыша; W – множество векторов ошибок; Z – множество векторов управления. Переходная матрица состояния определяется характером передаваемой информации и типом используемого кода. Модель наблюдения представим в виде:

$$\vec{Y}_{k+1}(g) = C\vec{X}_{k+1}(g) \oplus D(k,k+1)\vec{W}_k(g), \quad (2)$$

где $\vec{Y}_{k+1}(g)$ – вектор наблюдения; C – матрица передачи системы; $\vec{W}_{k+1}(g)$ – вектор ошибки; $D(k,k+1)$ – переходная матрица ошибок.

Матрица $D(k,k+1)$ формируется на основании знаний о характере ошибок в канале связи. Эти знания могут быть получены из результатов стохастического анализа ошибок в соответствующих каналах связи. Вместе с тем формирование матрицы $D(k,k+1)$ возможно на основании решения игры Γ< H, X, W > относительно вектора $\vec{W}(k+1)$. Такая ситуация может возникнуть в случае, когда источником помех является станция с аналогичным способом формирования сообщений. Это может быть либо своя подобная станция, либо активный подавитель противника.

Предположим, что на систему воздействует игровая помеха, которая является наиболее опасной для приемника даже при наличии априорных сведений о ней. Для описания игровой ситуации необходимо определить функцию выигрыша. Очевидно, что для систем радиосвязи функция выигрыша в первую очередь должна отображать изменение качества связи.

В общем случае представим функцию выигрыша следующим образом:

$$h_{ij} = \sum_{l=1}^{N} k_l D_{lij}, \quad (3)$$

где D_{lij} – значение l-го показателя, влияющего на функцию выигрыша, при выборе игроками, соответственно, i-й и j-й стратегий; N – количество показателей, участвующих в формировании функции выигрыша; k_l – коэффициент, учитывающий влияние l-го показателя и приводящий его к безразмерной величине. Выбор конкретных показателей зависит от задач, которые должна решать система связи, и требований к ней предъявляемых. Это же определяет и величину коэффициентов.

Для учета нестационарности реальных каналов связи необходимо рассматривать конфликты, развивающиеся во времени. Такие конфликты моделируются многошаговыми играми [5]. В информационных системах часто складываются конфликтные ситуации, в которых одна из сторон не может количественно оценить эффективность способов действия противоположной стороны. Традиционно проблема о функции выигрыша решается в двух аспектах: принимается допущение о знании игроками функции выигрыша или теоретико-игровая модель строится таким образом, что неизвестный параметр включается как элемент стратегии соответствующего игрока. Однако не всегда эти аспекты приводят к построению достаточно адекватной модели, и поэтому возникает необходимость учесть разные объемы информации у игроков о функции выигрыша. Один из таких подходов приводит к специальному классу позиционных антагонистических игр двух лиц.

Игроками 1 и 2 являются противники, преследующие прямо противоположные цели и имеющие конечное число возможных вариантов действий. Функция выигрыша игрока 1 задана множеством матриц $H = \{H_1, H_2, \ldots, H_r\}$. Игрок 0 делает ход, не преследуя какой-либо цели, выбирает $q \in \{1, 2, \ldots, r\}$. Число q сообщается только игроку 1. Последний, зная матрицу $H_q = \|h_{qij}\|$, выбирает число i ($i = 1, 2, \ldots, m$). В отличие от него игрок 2 должен выбрать число j ($j = 1, 2, \ldots, n$), зная только множество $Q=\{1, 2, \ldots, r\}$ и распределение вероятностей P_q на нем, в соответствии с которым выбирается $q \in Q$. Игрок 1, зная последнее обстоятельство, может использовать его в своих интересах и увеличить выигрыш. Игроку 2 тогда остается только не дать игроку 1 увеличить выигрыш более, чем это обусловлено разными объемами информации о функции выигрыша.

Для вычисления оптимальных стратегий и значения игры представим ее как позиционную игру с неполной информацией, в которой первый ход делает игрок 0, второй – игрок 1, а третий – игрок 2 .

Стратегия игрока 1 – это функция на семействе информационных множеств $U_1 = \{U_1^1, \ldots, U_1^r\}$, которая принимает значение из интервала [1, m]. Поскольку у игрока 1 имеется r различных информационных множеств, стратегию игрока 1 можно изобразить набором r чисел (i_1, i_2, …, i_r), где $i_k \in [1, m]$ для $k = 1, 2, \ldots, r$. Обозначим чистую стратегию игрока 1 через $x_{(i_1,\ldots,i_r)}$. Игрок 2 не имеет информации о первом и втором ходе, поэтому его стратегия определяет только выбор числа j. Следовательно, стратегию этого игрока можно записать как:

$$y_j = \left(\overbrace{0,\dots,0}^{j-1},1,0,\dots,0 \right) \text{ для } j = 1,2,\dots,n. \quad (4)$$

Очевидно, что число чистых стратегий игрока 1 равно m_r, а число чистых стратегий игрока 2 равно n. Каждая пара стратегий $\left(x_{(i_1,\dots,i_r)}, y_j \right)$ определяет математическое ожидание выигрыша $h_{(i_1,\dots,i_r)}, j$ игрока 1 в позиционной игре с неполной информацией:

$$h_{(i_1,\dots,i_r)}, j = \sum_{k=1}^{r} h^k_{i_k j} P_k , \quad (5)$$

которое является соответствующим элементом матрицы нормальной формы позиционной игры.

Оптимальную стратегию игрока 1 запишем в виде $X^* = \left\{ \xi^* \left(x_{i_1 \dots i_r} \right) \right\}$, где $\xi^* \left(x_{i_1 \dots i_r} \right)$ – вероятность применения чистой стратегии $x_{(i_1,\dots,i_r)}$. Оптимальной стратегией игрока 2 будет $Y^* = \left\{ \eta^* \left(y_j \right) \right\}$, где $\eta^* \left(y_j \right)$ – вероятность применения чистой стратегии y_j.

Соответственно, значение игры будет равно:

$$v = \sum \sum h_{(i_1 \dots i_r) j} \xi^* \left(x_{i_1 \dots i_r} \right) \eta^* \left(y_j \right). \quad (6)$$

Проиллюстрируем построение и решение игры с различной информацией о функции выигрыша у игроков на конкретном примере.

Предположим, что постановщик помех использует два типа источников помех: аналогичную станцию и хаотическую импульсную помеху. В свою очередь передатчик, зная эффективность этих средств, может выбрать ресурс A_1 и A_2. Поскольку передатчик и постановщик помех преследуют прямо противоположные цели, моделью этой конфликтной ситуации является одноходовая конечная игра. За выигрыш примем коэффициент эффективности использования ресурса, который вычисляется как отношение:

$$h^q_{ij} = P^q{}_{\text{пп}\, ij} / \beta_j , \quad (7)$$

где $P^q_{\text{пп}\, ij}$ – вероятность правильного приема в условиях шумов q-го типа при j-м ресурсе и i-м источнике помех; β_j – значение j-го ресурса.

При этих условиях модель цифровой радиосистемы будет иметь вид:

$$\vec{X}_{k+1}(g) = A(k+1,k)\vec{x}_k(g) \oplus \Gamma(k+1,k)\vec{Z}_k(g), \quad (8)$$

$$\vec{Y}_{k+1}(g) =$$
$$= C\vec{X}_{k+1}(g) \oplus D(k,k+1)\vec{W}_k(g) \oplus B(k,k+1)\vec{W}^p_k(g), \quad (9)$$

где $\vec{W}_k(g)$ – вектор шума; $\vec{W}^p_k(g)$ – вектор помехи; $D(k,k+1), B(k,k+1)$ – соответствующие матрицы переходов.

Распределение вероятности векторов состояния и наблюдения для полученной модели будет вычисляться по следующим формулам:

$$P_{k+1}\left[\vec{x}(g)\right] = \pi_A P_k \left[\vec{x}(g)\right] ,$$

$$P_{k+1}\left[\vec{X}(g)\right] = P_{k+1}\left[\vec{x}(g)\right] * P_{k+1}\left[\vec{Z}[g]\right] ,$$

$$P_{k+1}\left[\vec{Z}(g)\right] = \pi_\Gamma P_k \left[\vec{Z}(g)\right] ,$$

$$P_{k+1}\left[\vec{W}_\Sigma(g)\right] = \pi_D P_k \left[\vec{W}(g)\right] * \pi_B P_k \left[\vec{W}^p(g)\right], \quad (10)$$

$$P_{k+1}\left[\vec{Y}(g)\right] = P_{k+1}\left[\vec{X}(g)\right] * \pi_D P_k \left[\vec{W}(g)\right] * \pi_B P_k \left[\vec{W}^p(g)\right] =$$
$$= P_{k+1}\left[\vec{X}(g)\right] * P_{k+1}\left[\vec{W}_\Sigma(g)\right].$$

Для вычисления величина $P^q_{\text{пп}\, ij}$ необходимо определить, какие значения могут принимать векторы шума, помехи и управления на следующем шаге. А именно, надо определить: $\vec{W}_k(q), P_k\left[\vec{W}(q)\right]$, $\vec{W}^p_k(i), P^i_k\left[W^p(i)\right]$, $\vec{Z}_k(j), P_k\left[\vec{Z}(j)\right]$. Для j-го ресурса задаются матрицы переходных вероятностей π^j_Γ, а для i-го источника помех матрицы переходных вероятностей π^i_D.

Сводка формул для вычисления элементов матрицы выигрышей примет вид:

1. Модель адаптивной цифровой информационной системы с управлением:

$$\vec{X}_{k+1}(g) = A(k+1,k)\vec{x}_k(g) \oplus \Gamma(k+1,k)\vec{Z}_k(g),$$

$$\vec{Y}_{k+1}(g) =$$
$$= C\vec{X}_{k+1}(g) \oplus D(k,k+1)\vec{W}_k(g) \oplus B(k,k+1)W^p_k(g).$$

2. Уравнение вектора управления:

$$\vec{Z}_{k+1} = \Gamma(k+1,k)\vec{Z}_k(g) = \Gamma(k+1,k)\hat{Z}_k(g) \oplus$$
$$\oplus A(k+1,k)\left[\hat{x}_k(g) \oplus \vec{x}_k(g)\right] \oplus$$
$$\oplus D(k+1,k)\left[\hat{W}_k(g) \oplus \vec{W}_k(g)\right] \oplus$$
$$\oplus B(k+1,k)\left[\hat{W}^p_k(g) \oplus \vec{W}^p_k(g)\right].$$

3. Начальные условия

$$\vec{x}_0(g), \vec{Z}_0(g), \vec{W}_0(g), P_0\left[\vec{x}(g)\right], P_0\left[\vec{W}(g)\right],$$
$$P_0\left[\vec{Z}(g)\right], P_0\left[\vec{W}^p(g)\right].$$

4. Априорные данные

$$\vec{W}_{\Sigma,k}(g) = \vec{W}_k(g) \oplus \vec{W}^p_k(g), P\left[\vec{X}(g) \cdot \vec{W}_\Sigma(g)\right] =$$
$$= P\left[\vec{X}(g)\right] \cdot P\left[\vec{W}_\Sigma(g)\right], \pi_A, \pi_\Gamma, \pi_D, \pi_B.$$

5. Оценивание векторов сообщения, управления и ошибки:

$$\hat{x}_k(g) = \phi\left\{P_k\left[\vec{x}(i)/\vec{Y}(j)\right] = \frac{P_k\left[\vec{x}(i)\right]\cdot\sum_{l=0}^{2^n-1}P_k\left[\vec{Z}(l\oplus j)\right]P_k\left[\vec{W}_\Sigma(l\oplus i)\right]}{P_k\left[\vec{Y}(j)\right]}\right\}, \tag{11}$$

$$\hat{Z}_k(g) = \phi\left\{P_k\left[\vec{Z}(i)/\vec{Y}(j)\right] = \frac{P_k\left[\vec{Z}(i)\right]\cdot\sum_{l=0}^{2^n-1}P_k\left[\vec{x}(l\oplus j)\right]P_k\left[\vec{W}_\Sigma(l\oplus i)\right]}{P_k\left[\vec{Y}(j)\right]}\right\}, \tag{12}$$

$$\hat{W}_{\Sigma,k}(g) = \phi\left\{P_k\left[\vec{W}_\Sigma(i)/\vec{Y}(j)\right] = \frac{P_k\left[\vec{W}_\Sigma(i)\right]\cdot P_k\left[\vec{X}(i\oplus j)\right]}{P_k\left[\vec{Y}(j)\right]}\right\}, \tag{13}$$

где φ – мода апостериорного распределения вероятностей ошибки.

6. Вычисление вероятности правильного приема вектора сообщения:

$$P_{\text{пп}}\left[\vec{x}(g)\right] = \sum_{l=0}^{2^n-1}P_1\left[\hat{x}(l)\right]P_1\left[\vec{x}(l)\right]. \tag{14}$$

7. Определение матрицы выигрышей:

$$h_{ij}^q = P^q{}_{\text{пп}\,ij}/\beta_j\,. \tag{15}$$

Принятие решения о векторе управления производится следующим образом.

Пусть в условиях шумов 1-го типа матрица выигрыша игрока 1 имеет вид:

$$H^1 = \begin{pmatrix} h_{11}^1 & h_{12}^1 \\ h_{21}^1 & h_{22}^1 \end{pmatrix}, \tag{16}$$

где h_{ij}^1 – коэффициент эффективности в условиях шумов первого типа при j-м ресурсе и i-м источнике помех.

Очевидно, что если шумы в начальный момент будут второго типа, то матрица выигрышей игрока 1 примет следующий вид:

$$H^2 = \begin{pmatrix} h_{11}^2 & h_{12}^2 \\ h_{21}^2 & h_{22}^2 \end{pmatrix}, \tag{17}$$

где h_{ij}^2 – коэффициент эффективности в условиях шумов второго типа при j-м ресурсе и i-м источнике помех.

Предположим теперь, что постановщик помех не знает, каким был начальный уровень шумов. Тогда матрица выигрыша игрока 1 примет вид:

$$H^k = \begin{pmatrix} h_{11}^k & h_{12}^k \\ h_{21}^k & h_{22}^k \end{pmatrix}, \tag{18}$$

где h_{ij}^k – коэффициент эффективности в условиях шумов k-го типа при j-м ресурсе и i-м источнике помех.

Как видно, в этом случае игроку 1 известно значение функции выигрыша, а игрок 2 знает только множество значений этой функции.

Предположим, что вероятность возникновения шумов первого типа равна $P_1 = 1/3$, а второго – $P_2 = 2/3$. При условии, что известны матрицы H_1 и H_2, определим нормальную форму позиционной игры с неполной информацией. В результате получим матрицу вида:

$$H = \left\|\begin{matrix} h_{(11)1} = h_{11}^1P_1 + h_{11}^2P_2 & h_{(11)2} = h_{12}^1P_1 + h_{12}^2P_2 \\ h_{(12)1} = h_{11}^1P_1 + h_{21}^2P_2 & h_{(12)2} = h_{12}^1P_1 + h_{22}^2P_2 \\ h_{(21)1} = h_{21}^1P_1 + h_{11}^2P_2 & h_{(21)2} = h_{22}^1P_1 + h_{12}^2P_2 \\ h_{(22)1} = h_{21}^1P_1 + h_{21}^2P_2 & h_{(22)2} = h_{22}^1P_1 + h_{22}^2P_2 \end{matrix}\right\|. \tag{19}$$

Решаем матричную игру с матрицей выигрыша H методами линейного программирования [6] и получим значение игры и вероятности применения чистой стратегии $x_{(i_1\ldots i_r)}$ и чистой стратегии y_j: $\xi^*(x_{11}), \xi^*(x_{12}), \xi^*(x_{21}), \xi^*(x_{22}), \eta^*(y_1), \eta^*(y_1)$.

Затем определим оптимальную стратегию поведения игрока 1 следующим образом: $f^* = \left(\left(\bar{\xi}_1^1, \bar{\xi}_1^2\right), \left(\bar{\xi}_2^1, \bar{\xi}_2^2\right)\right)$, где $\bar{\xi}_i^k = \sum \xi^*\left(x_{i_1\ldots i_r}\right)\mu_i^k$, $\mu_{i_k}^k = 1, \mu_{i_{l\neq k}}^k = 0$ для $l = 1, 2,\ldots, r$.

Для игрока 2 оптимальная стратегия поведения соответствует его оптимальной смешанной стратегии, т. е. $g^* = \left(\eta^*(y_1), \eta^*(y_2)\right)$.

Библиографические ссылки

1. *Хворенков В. В.* Математические модели, алгоритмы и аппаратные средства для управления ресурсами цифровых информационных радиотехнических систем : дис. … д-ра техн. наук. – Ижевск, 2002.

2. *Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч.* Пространство состояний в теории управления / пер. с англ. – М. : Наука, 1970. – 620 с.

3. *Дюбин Г. Н., Суздаль В. Г.* Введение в прикладную теорию игр. – М. : Наука, 1981 – 334 с.

4. *Вейцель В. А., Жодзишский М. И., Жодзишский Ю. И.* Гарантированная помехоустойчивость приема сигналов // Радиотехника и электроника. – 1987. – № 2, т 32. – С. 62–67.

5. *Дюбин Г. Н., Суздаль В. Г.* Указ. соч.
6. Там же.

* * *

V. V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU
A. V. Saveliev, DSc in Engineering, Professor, General Director of JSC “Sarapul Radioworks”
P. V. Karavaev, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

Solution of the resource management task in digital radio system using the game theory approach

Main types of conflicts appearing in radio engineering information systems are listed. An algorithm which overcomes the conflicts in process of optimal resources management of radio system is obtained.

Keywords: radio communication system, conflict, game theory, payoff function, optimal strategy, resource management.

Получено: 10.05.16