УДК 519.6:621.391

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ РАДИОСРЕДСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ОПТИМИЗИРОВАННОГО ПОДАВЛЕНИЯ

Д.Л. Осипов, к.т.н. Л.А. Клименко
(представил д.т.н., проф. В.В. Федоренко)

Предложена динамическая модель учета связности элементов сети связи при перемещении радиосредств и переориентации источников помех. Рассчитаны гарантированные выигрыши системы управления связью в условиях оптимизированного воздействия системы радиоподавления при различных степенях их взаимной информированности.

Одним из путей защиты системы связи от преднамеренного воздействия источников помех (ИП) является изменение местоположения подвижных радиосредств (РС) [1]. Однако физические законы природы, определяющие конечность любых переходных процессов, всегда будут причиной объективных и неустранимых динамических и связанных с ними информационных ограничений, которые определяют актуальность задач поиска оптимальных алгоритмов управления, учитывающих данные ограничения. Поэтому при моделировании и реализации системы управления связью (СУС) необходимо учитывать инерционность изменения связности РС, приводящей к непроизводительным потерям времени и, в конечном счете, к снижению средней реализованной скорости передачи даже при отсутствии помех.

Однако часто оказывается более целесообразным потерять время на изменение связности между РС, чем потерять связь совсем вследствие воздействия ИП. Исследованию относительной доли данных потерь в условиях оптимизированного воздействия со стороны системы радиоподавления (СРП), имеющей аналогичные динамические и информационные ограничения, при различных степенях взаимной информированности СУС и СРП посвящена данная работа.

Для вскрытия основных закономерностей в структуре оптимальных стратегий переключения связности РС предлагается достаточно простая, но чувствительная к динамическим и информационным ограничениям модель, представленная на рис. 1. Здесь элементом СУС является канал наблюдения (КН) за состоянием ИП, а элементом СРП – канал разведки (КР) за состоянием РС. Каждому из $\mathbf{M = N = 3}$-х узлов данных графов соответствует одно из возможных состояний связности РС и режима работы (настройки, ориентации) ИП. Крайние узлы графа СУС с номерами $\mathbf{m = 1}$ и $\mathbf{m = 3}$ соответствуют двум переключаемым состояниям связности РС (активным состояниям), в любом из которых при отсутствии помех обеспечивается передача информации с некоторым условным качеством (например, относительной реализованной скоростью) $\mathbf{q\ (m = 1) = q\ (m = 3) = 1}$.

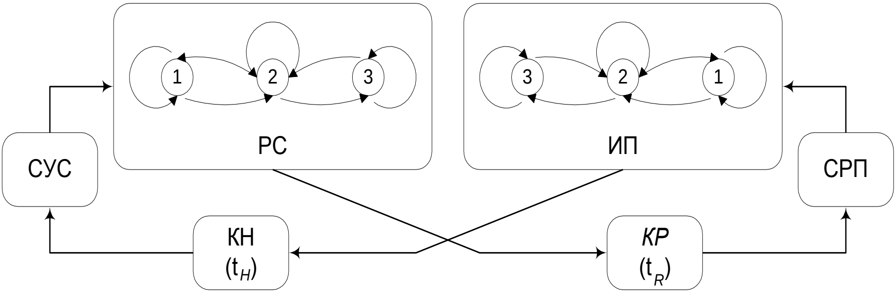

Рис. 1. Модель антагонистического взаимодействия контуров систем управления связью и радиоподавления

Промежуточный узел с номером $\mathbf{m = 2}$ соответствует переходному (пассивному) состоянию при переключении связности, при котором передача информации отсутствует, т.е. $\mathbf{q\ (m = 2) = 0}$.

Аналогично, крайние узлы графа СРП с номерами $\mathbf{n = 1}$ и $\mathbf{n = 3}$ соответствуют активным состояниям ИП, обеспечивающим подавление связи между РС в состояниях с номерами $\mathbf{m = 1}$ и $\mathbf{m = 3}$. Промежуточный узел с номером $\mathbf{n = 2}$ соответствует переходному (пассивному) состоянию при переориентации ИП от подавления одной связи к подавлению другой.

На каждом очередном шаге игры $\boldsymbol{l} = \mathbf{1, ..., L}$, длящемся в течение единичного отрезка времени $\mathbf{t}$, в зависимости от текущего совместного состояния РС и ИП $\mathbf{\{(m, n)\}_{MN}}$ качество связи $\mathbf{q}_{\boldsymbol{l}}$ может принимать одно из значений **0** или **1** в соответствии со следующей матрицей одношаговых выигрышей первого игрока (СУС):

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \mathbf{q_{11}} & \mathbf{q_{12}} & \mathbf{q_{13}} \\ \mathbf{q_{21}} & \mathbf{q_{22}} & \mathbf{q_{23}} \\ \mathbf{q_{31}} & \mathbf{q_{32}} & \mathbf{q_{33}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где номер строки $\mathbf{m = 1, ..., 3}$ соответствует номеру текущего состояния первого игрока, а номер столбца $\mathbf{n = 1, ..., 3}$ – номеру текущего состояния второго игрока. В качестве обобщенного показателя эффективности будем рассматривать средний выигрыш за один шаг $\mathbf{Q}$, вычисляемый следующим образом:

$$\mathbf{Q} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{L}} \sum_{\boldsymbol{l}=1}^{\mathbf{L}} \mathbf{q}_{\boldsymbol{l}} \quad . \tag{2}$$

Описанная выше динамическая модель соответствует условиям наличия неустранимых минимальных задержек наблюдений $\mathbf{t_H}$ в КН и разведки $\mathbf{t_R}$ в КР, не позволяющих «видеть» состояния, соответственно, ИП и РС на следующем шаге игры. В общем случае при произвольных ненулевых задержках в КН и КР описанные условия соответствуют классу игр, в которых алгоритмы управления и подавления описываются смешанными абсолютными или относительными программными стратегиями уклонения и преследования. Рассмотрим три крайних случая соотношения длительностей одного шага $\mathbf{t}$ и задержек в КН $\mathbf{t_H}$ и КР $\mathbf{t_R}$: 1) $\mathbf{t_H \le t}$, $\mathbf{t_R \le t}$; 2) $\mathbf{t_H >> t}$, $\mathbf{t_R >> t}$; 3) $\mathbf{t_H >> t}$, $\mathbf{t_R \le t}$.

Первый случай соответствует условиям почти полной взаимной наблюдаемости. В соответствии с методом синтеза оптимальных стратегий СУС и СРП, в данном случае следует искать оптимальные стратегии в классе относительных (марковских) смешанных стратегий поведения [2], описываемых приведенными ниже матрицами условных вероятностей $\mathbf{m}(l) = \left\{\mu_{ij}^{k}\right\}_{MM}^{N}$ и $l(l) = \left\{\lambda_{ij}^{k}\right\}_{NN}^{M}$ перевода РС и ИП из состояния $\mathbf{i}$ в состояние $\mathbf{j}$, зависящих от номера шага l, текущего собственного состояния $\mathbf{i}$ и наблюдаемого состояния противника $\mathbf{k}$:

$$\mu(l) = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & 0 \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ 0 & \mu_{32} & \mu_{33} \end{pmatrix}; \ \lambda(l) = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ 0 & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где $\mathbf{m}_{ij} = \left\{\mu_{ij}^{1}, \mu_{ij}^{2}, \mu_{ij}^{3}\right\}$, $l_{ij} = \left\{\lambda_{ij}^{1}, \lambda_{ij}^{2}, \lambda_{ij}^{3}\right\}$, $\mathbf{i, j = 1, ..., M = N = 3}$. Верхний индекс $\mathbf{k = 1, ..., 3}$ соответствует контролируемому номеру со стороны СУС и СРП текущего состояния, соответственно, ИП и РС. Нулевые значения условных вероятностей в матрицах (3) отражают невозможность перехода за один шаг из одного активного состояния в другое.

Оптимальные стратегии поведения в виде распределений условных вероятностей $\mathbf{m}^*(l)$ и $l^*(l)$ могут быть найдены в данном случае с помощью конкретизированного (для подобных условий) метода динамического программирования. Как показано в [3], с ростом количества шагов уже при $\mathbf{L > 10}$ оптимальные стратегии поведения достаточно точно (с точностью $\mathbf{e < 0.0001}$) описываются стационарными распределениями условных вероятностей $\mathbf{m}^*$ и l^* вида (3), не зависящими от номера шага l. Используя данное свойство стационарных стратегий, удалось найти следующее аналитическое решение рассматриваемой задачи:

$$\mu^* = \begin{pmatrix} \{\alpha,\alpha,1\} & \{1-\alpha,1-\alpha,0\} & 0 \\ \{0,0.5,1\} & \{0,0,0\} & \{1,0.5,0\} \\ 0 & \{0,1-\alpha,1-\alpha\} & \{1,\alpha,\alpha\} \end{pmatrix}; \ \lambda^* = \begin{pmatrix} \{\beta,0,0\} & \{1-\beta,1,1\} & 0 \\ \{\beta,0.5,0\} & \{1-\beta,0,1-\beta\} & \{0,0.5,\beta\} \\ 0 & \{1,1,1-\beta\} & \{0,0,\beta\} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{Q^* = 1 - \beta}\ , \tag{4}$$

где $\boldsymbol{\alpha = 1 - \sqrt{2/3} \approx 0.1835}$; $\boldsymbol{\beta = 3 - \sqrt{6} \approx 0.5505}$. При этом $\mathbf{Q^* \approx 0.4495}$.

Второй случай ($\mathbf{t_H >> t}$, $\mathbf{t_R >> t}$) соответствует условиям отсутствия взаимного наблюдения за текущими состояниями РС и ИП, что может соответствовать неразличимости текущих активных состояний и результатов подавления вследствие использования соответствующих режимов работы линий связи между РС.

В данном случае в соответствии с известными принципами решения игр с задержкой информации [3] оптимальные стратегии игроков должны отражать их стремление к наибольшей неопределенности взаимного состояния. При этом в данном случае первому игроку целесообразно как можно реже прибегать к переключению активных состояний, так как это не влияет на текущее состояние, выбираемое вторым игроком, но приводит к потерям времени на переключения. Формально в рамках трактовки среднего выигрыша по результатам бесконечного количества игр с бесконечной длительностью с учетом вышесказанного можно свести рассматриваемую многошаговую игру к одношаговой матричной игре с матрицей выигрыша

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

в которой чистым стратегиям игроков соответствует выбор на первом шаге одного из двух активных состояний. Очевидно, оптимальными стратегиями обоих игроков в данном случае является однократное переключение РС и ИП в начале игры с вероятностью $\mathbf{m}^* = \boldsymbol{l}^* = \mathbf{0.5}$ в одно из активных состояний. При этом гарантируемый выигрыш первого игрока составит $\mathbf{Q^* = 0.5}$. Интересно, что условия отсутствия взаимной наблюдаемости оказались хотя и в незначительной степени, но предпочтительнее для первого игрока, чем условия почти полной взаимной наблюдаемости, т.к. $\mathbf{Q^* = 0.5 > Q^* = 0.4495}$.

Третий случай ($\mathbf{t_H >> t}$, $\mathbf{t_R \le t}$) соответствует условиям почти полной наблюдаемости РС со стороны СРП и невозможности наблюдения за текущим состоянием ИП со стороны СУС. Подобные условия дискриминации СУС соответствуют условиям неразличимости текущих результатов подавления активных состояний, например, вследствие значительного преобладания величины задержки сигнала в каналах связи (каналы наблюдения) по сравнению с каналами утечки (перехвата) (каналы разведки) или при использовании режимов работы линий связи между РС, не позволяющих быстро и однозначно определить степень подавления текущего активного состояния.

В данном случае, первый игрок не знает текущего состояния ИП, но знает, что его собственное состояние РС наблюдается со стороны СРП на каждом шаге. Следовательно, оптимальные стратегии игроков можно искать в классе смешанных стратегий поведения, описываемых матрицами условных вероятностей вида (3), но теперь уже со скалярным значением вероятностей $\mathbf{m_{ij}}$, $\mathbf{i, j = 1, ..., 3}$, не зависящих от текущего состояния ИП $\mathbf{k = 1, ..., 3}$, которое не наблюдается со стороны СУС.

Решение игры при конечном числе шагов $\mathbf{L}$ оказывается громоздким, а стационарные стратегии при $\mathbf{L} \to \infty$ оказываются зависимыми от глубины памяти теперь уже первого игрока. Учитывая, что увеличение глубины памяти первого игрока может привести только к увеличению его выигрыша, можно в качестве нижней оценки гарантируемого выигрыша использовать решение игры при отсутствии памяти у первого игрока. Используя рассуждения, аналогичные приведенным в [3] при получении решения (4), удалось доказать, что в данном случае существует решение игры в классе простейших марковских стратегий без памяти, которому соответствуют следующие распределения условных вероятностей **m***, ***l**** и цена игры **Q***:

$$\mu^* = \begin{pmatrix} \alpha & 1-\alpha & 0 \\ 0.5 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1-\alpha & \alpha \end{pmatrix}; \qquad \lambda^* = \begin{pmatrix} \{\beta,\beta,0\} & \{1-\beta,1-\beta,1\} & 0 \\ \{1,0.5,0\} & \{0,0,0\} & \{0,0.5,1\} \\ 0 & \{1,1-\beta,1-\beta\} & \{0,\beta,\beta\} \end{pmatrix};$$

$$Q^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\alpha - \alpha^2\beta - 4\alpha\beta + \beta - \alpha^2 + 1}{3\alpha^2\beta + 2 - 7\alpha\beta + 2\beta - 3\alpha^2 + 5\alpha},$$

где $\alpha = 2 - \sqrt{3} \approx 0.2679$; $\beta = 1$. При этом $Q^* = \alpha = 2 - \sqrt{3} \approx 0.2679$.

Исследования различных стратегий первого игрока при увеличении глубины памяти показали, что при этом гарантируемый выигрыш первого игрока может быть увеличен до величины $Q^* = 1/3 \approx 0.3333$. При этом оказывается достаточным учет памяти первого игрока в пассивном состоянии о направлении начатого на предыдущем шаге перехода из одного активного состояния в другое.

Полученные результаты подтверждают очевидную предпочтительность для противника условий дискриминации СУС по наблюдаемости взаимных состояний и демонстрируют «ценность» наличия достоверной текущей информации о противнике, отсутствие которой в данном случае приводит к уменьшению гарантируемого выигрыша с $Q^* \approx 0.4495$ (см. первый случай) до $Q^* \approx 0.3333$.

С практической точки зрения во всех описанных случаях управление изменением связности РС по найденным оптимальным рандомизированным правилам позволяет, несмотря на наличие динамических ограничений в виде инерционности переключений, обеспечить нормальное функционирование линий связи между РС в зависимости от информационных ограничений взаимной наблюдаемости в течение 33 ÷ 50 % времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ли У. Техника подвижных систем связи. – М.: Радио и связь, 1985. – 392 с.*
2. *Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 214 с.*
3. *Петросян Л.А., Томский Г.В. Дифференциальные игры с неполной информацией. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1984.– 188 с.*

Поступила 15.07.2002

ОСИПОВ Дмитрий Леонидович*, научный сотрудник НИЛ филиала Ростовского военного института РВ (г. Ставрополь). Область научных интересов – сети передачи данных.*

КЛИМЕНКО Любовь Анатольевна*, канд. техн. наук, преподаватель УкрГАЖТ. Окончи-*

ла ХИИТ в 1995 году. Область научных интересов – обработка и передача информации.