

МЕТОДИКА ВИБОРУ СТРАТЕГІЙ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ ТЕОРІЇ ІГОР

В роботі розглядається задача підвищення ефективності функціонування системи радіозв'язку при впливі навмисних завад. Аналіз виграшу, який отримує система радіозв'язку в різних ситуаціях, показав, що теорія ігор не тільки дозволяє сформулювати оптимальну стратегію, що забезпечує гарантії певного виграшу, але і дозволяє видати рекомендації по її зміні з метою збільшення виграшу, якщо система радіоелектронного подавлення відступає від своєї оптимальної стратегії. Якщо результати оцінки не влаштовують, то необхідно вживати заходи по зміні ситуації: збільшувати потужність передавача, застосовувати інші сигнали, змінювати режим роботи.

Ключові слова: система радіозв'язку, радіоелектронне подавлення, навмисні завади, теорія ігор.

Вступ

Провідні країни світу приділяють велику увагу розробці та удосконаленню систем та засобів радіоелектронної боротьби [1-3]. Засоби радіоелектронного подавлення (РЕП) здатні з високою ефективністю та у короткий час подавити систему радіозв'язку, побудовану на традиційних принципах. Враховуючі це, стає досить складним завдання забезпечення стійкого радіозв'язку в умовах РЕП. Успішне її вирішення неможливо без застосування спеціальних технічних і організаційних заходів по забезпеченню заводозахисності систем і засобів радіозв'язку.

Впливаючи на приймальні пристрої, завади імітують або спотворюють прийняті сигнали, утруднюють або виключають виділення корисної інформації, ведення радіопереговорів, знижують дальність дії і якість роботи систем управління.

Одним з ефективних способів підвищення ефективності систем радіозв'язку (СРЗ), які функціонують в умовах апріорної невизначеності щодо умов ведення зв'язку, сигнальної і заводової обстановки, є застосування в них адаптивних методів формування і обробки сигналів. Алгоритм їх функціонування передбачає заповнення відсутньої апріорної інформації щодо умов ведення зв'язку, які змінюються, та використання її для управління параметрами і режимами роботи радіолінії з метою забезпечення необхідних показників якості [4, 5]. Це потребує реалізації в СРЗ автоматизованого процесу пристосування до сигнальної і заводової обстановки. При цьому здійснюється оцінка поточного стану функціонування радіолінії і цілеспрямована зміна одного або декількох її параметрів для максимізації показників ефективності процесу передачі інформації.

В умовах антагоністичної протидії системи РЕП і адаптивної СРЗ процес управління системою радіозв'язку доцільно доповнити ігровим підходом, який найбільше враховує різноманіття і ефективність стратегій в умовах невизначеності.

Тому, метою роботи є розробка методики оперативного управління засобами заводозахисту системи радіозв'язку на базі теорії ігор.

Основна частина

Особливістю інформаційного конфлікту підсистеми оперативного управління засобами заводозахисту СРЗ і системи РЕП є те, що протидіючі сторони, які мають декілька способів дій, можуть застосовувати їх багаторазово, вибираючи найкращий спосіб з урахуванням інформації про дії протилежної сторони (рис. 1).

При цьому кожний крок вирішення конфлікту характеризується не фінальним станом, а деякою платіжною функцією. Традиційний ігровий підхід до аналізу заводозахисності СРЗ не дозволяє врахувати багатокроковість конфлікту і не відображує залежність способів дій сторін від інформації про протилежну сторону [6]. Відомий конфліктний підхід на основі розрахунку фінальних ймовірностей перебування систем у стані виграшу до заданого

моменту часу не відображує багатоваріантність дій сторін і неповну завершеність конфлікту на кожному кроці [7].

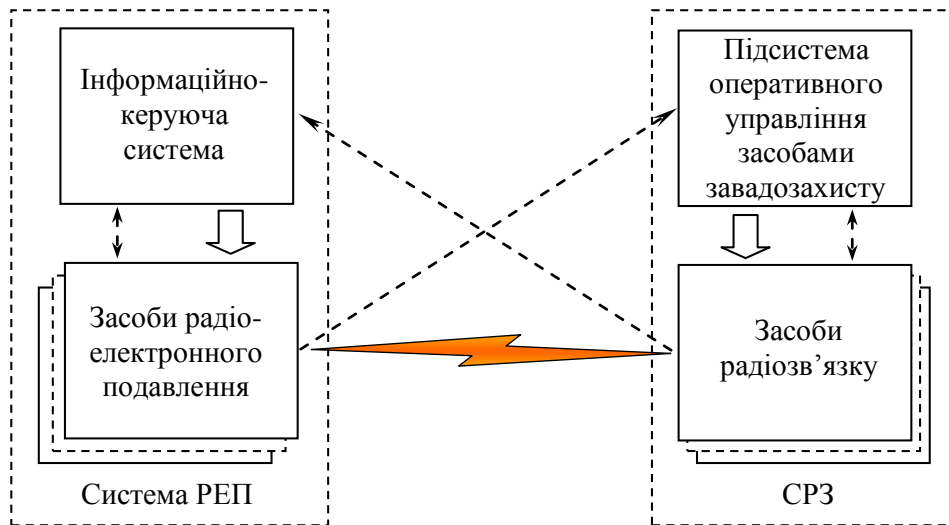


Рис. 1. Схема інформаційного конфлікту ВСПЗ і системи РЕП

Розглянутий конфлікт по своїй суті є нескінченно кроковим. Для характеристики його поточного стану будемо використовувати показник заводозахисності ВСПЗ $a_{ij} = P_{ПOM}$ при реалізації в ній i -ї, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, стратегії (способу) заводозахисту і застосуванні j -ї, $j \in J = \{1, 2, \dots, m\}$, стратегії (способу) створення заводів, де $P_{ПOM}$ – ймовірність помилкового приймання сигналів, m і n – кількість стратегій ПЗ і створення заводів, реалізованих у ВСПЗ і в системі РЕП відповідно.

Стороною А назвемо підсистему оперативного управління засобами заводозахисту, стороною В – система РЕП, а величину a_{ij} – вигрешем сторони А (прогрешем сторони В) у ситуації (i, j) .

При традиційному ігровому підході до аналізу заводозахисності ВСПЗ передбачається, що сторонам відома матриця гри і скінченна множина стратегій суперника, але невідомо, яка стратегія реалізується в конкретній ситуації [6]. У цьому випадку в матричній грі формалізується ситуація вибору стратегій заводозахисту в умовах невизначеності. Однак такий підхід не відображує динаміку конфлікту, а також можливість цілеспрямованого вибору стратегій заводозахисту на кожному кроці залежно від інформації про дії системи РЕП. Тому пропонується для опису розглянутого конфлікту використати модель нескінченно-крокової матричної гри із запізнюванням і помилками в інформованості сторін про дії супротивника (матрично-ігрового процесу). Позначимо: $T_{ВСПЗ}(T_{РЕП})$ – час однократної реалізації стороною А (В) своєї чистої стратегії; $t_{ВСПЗ}(t_{РЕП})$ – час реакції сторони А (В), який дорівнює інтервалу часу від моменту початку реалізації стратегії стороною В (А) до моменту початку реалізації відповідної стратегії стороною А (В).

Будемо вважати, що сторонам відома: матриця гри $\mathbf{A} = (a_{ij})_m^n$, множини активних стратегій I, J і оцінки величин $T_{ВСПЗ}(T_{РЕП})$ і $t_{ВСПЗ}(t_{РЕП})$; матриця гри \mathbf{A} є невідродженою і має рішення у вигляді ціни гри ν і векторів оптимальних змішаних стратегій сторони А –

$P^* = (P_1^*, P_2^*, \dots, P_i^*, \dots, P_n^*)$ і сторони $B - Q^* = (Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_j^*, \dots, Q_m^*)$; протягом часу гри T відсутнє післядія, а множини I і J є незмінними.

Методика призначена для адаптивної зміни параметрів і режимів роботи СРЗ за ігровим алгоритмом в залежності від наявності апріорної інформації о параметрах системи РЕП і стратегії створення нею завод системі радіозв'язку.

Сутність ігрового алгоритму управління полягає в порівнянні великої кількості можливих в даних умовах якісно різних рішень, визначенні оптимального або найкращого з урахуванням всіх обмежень рішення та формування відповідної команди.

Постановка завдання.

Задано: матриця гри $A = (a_{ij})_m^n$, множини чистих стратегій сторін А і В, а також ймовірно-часові характеристики системи РЕП.

Стратегіями СРЗ є параметри і режими роботи засобів радіозв'язку, стратегіями системи РЕП – різні види навмисних завод.

Необхідно: визначити оптимальну змішану стратегію СРЗ і необхідні ймовірно-часові параметри сторони А, що гарантують максимальний або заданий рівень її середнього виграшу за час $T \gg T_{СРЗ}$.

Обмеження:

СРЗ і система РЕП мають в своєму розпорядженні скінчену кількість стратегій; свої стратегії сторони СРЗ і система РЕП використовують незалежно один від одного, тобто кожна зі сторін не має інформації про дію, що здійснюється іншою стороною;

системі радіозв'язку відомий час $\Delta t_{оц}$, за який система РЕП зможе оцінити обстановку, прийняти рішення і змінити свої робочі параметри;

У класичній постановці матриця гри може бути задана табличним способом (табл. 1). Особливість полягає в принципах формування елементів матриці.

Таблиця 1

Матриця гри

$S_{СРЗ}$	$S_{РЕП}$						$\max_{a \in S_{СРЗ}} \min_{b \in S_{РЕП}} \Phi(b, a)$
	b_1	b_2	b_3	b_4	...	b_j	Φ_H
a_1	Φ_{11}	Φ_{12}	Φ_{13}	Φ_{14}	...	Φ_{1j}	
a_2	Φ_{21}	Φ_{22}	Φ_{23}	Φ_{24}	...	Φ_{2j}	
a_3	Φ_{31}	Φ_{32}	Φ_{33}	Φ_{34}	...	Φ_{3j}	
a_4	Φ_{41}	Φ_{42}	Φ_{43}	Φ_{44}	...	Φ_{4j}	
...	
a_j	Φ_{i1}	Φ_{i2}	Φ_{i3}	Φ_{i4}	...	Φ_{ij}	
$\min_{b \in S_{РЕП}} \max_{a \in S_{СРЗ}} \Phi(b, a)$	Φ_B						

При рішенні гри в чистих стратегіях у якості елементів стовпців і рядків S виступають стратегії СРЗ $S_{\text{СРЗ}}$ і системи РЕП $S_{\text{РЕП}}$: $a_i, i = \overline{1, I}$; $b_j, j = \overline{1, J}$, на перетині яких знаходиться відповідний їм відносний показник модифікованого виграшу СРЗ $0 \leq \Phi_{ij} \leq 1$.

Схема ігрової системи управління засобами завадозахисту СРЗ показана на рис. 2.

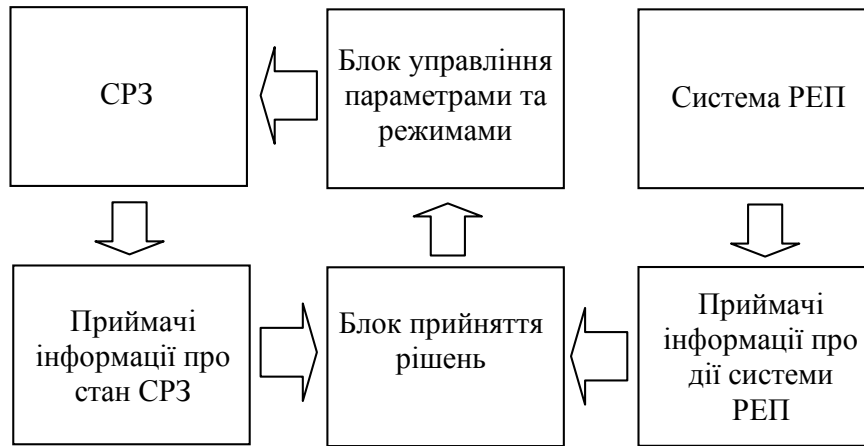


Рис. 2. Схема ігрової системи управління

В процесі багатокрокової гри при накопиченні стратегій з однієї та іншої сторони зростання розмірності ігрових матриць призводить до експоненціального зростання числа елементарних обчислювальних операцій, що веде до неприпустимого зростання тривалості циклу управління і зниження значення коефіцієнта адаптації k_a стосовно функції виграшу СРЗ. Коефіцієнт адаптації, усереднений по всіх інформаційних напрямках СРЗ (показник якості управління):

$$k_a(t) = (T_{\text{СРЗ}}/T_{\text{РЕП}})\alpha, \quad (1)$$

де $T_{\text{СРЗ}}, T_{\text{РЕП}}$ - час реакції, відповідно СРЗ і системи РЕП, рівний тривалості циклів управління; α - коригувальний і нормуючий множник, що визначає ступінь впливу відношення $T_{\text{СРЗ}}/T_{\text{РЕП}}$ на коефіцієнт адаптації.

Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд

$$\begin{aligned} k_a &= F_1(C_i, T_{\text{СРЗ}}, T_{\text{РЕП}}, H) \rightarrow \min; \\ P_{\text{пом}} &= F_2(C_i, Q^2, M, R, P_c, n, R, d) \leq P_{\text{пом доп}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де C_i - i -й режим роботи засобу радіозв'язку, H - стан засобів радіозв'язку, P_c - потужність сигналу, M - розмірність ансамблю сигналів, R - швидкість коригувального коду ($R = k/n$), k - кількість інформаційних біт у кодовій комбінації довжиною n , d - величина кодової відстані.

Методика вибору стратегій системи радіозв'язку на базі методів теорії ігор, блок-схема алгоритму реалізації якої представлена на рис. 3, складається з наступних етапів.

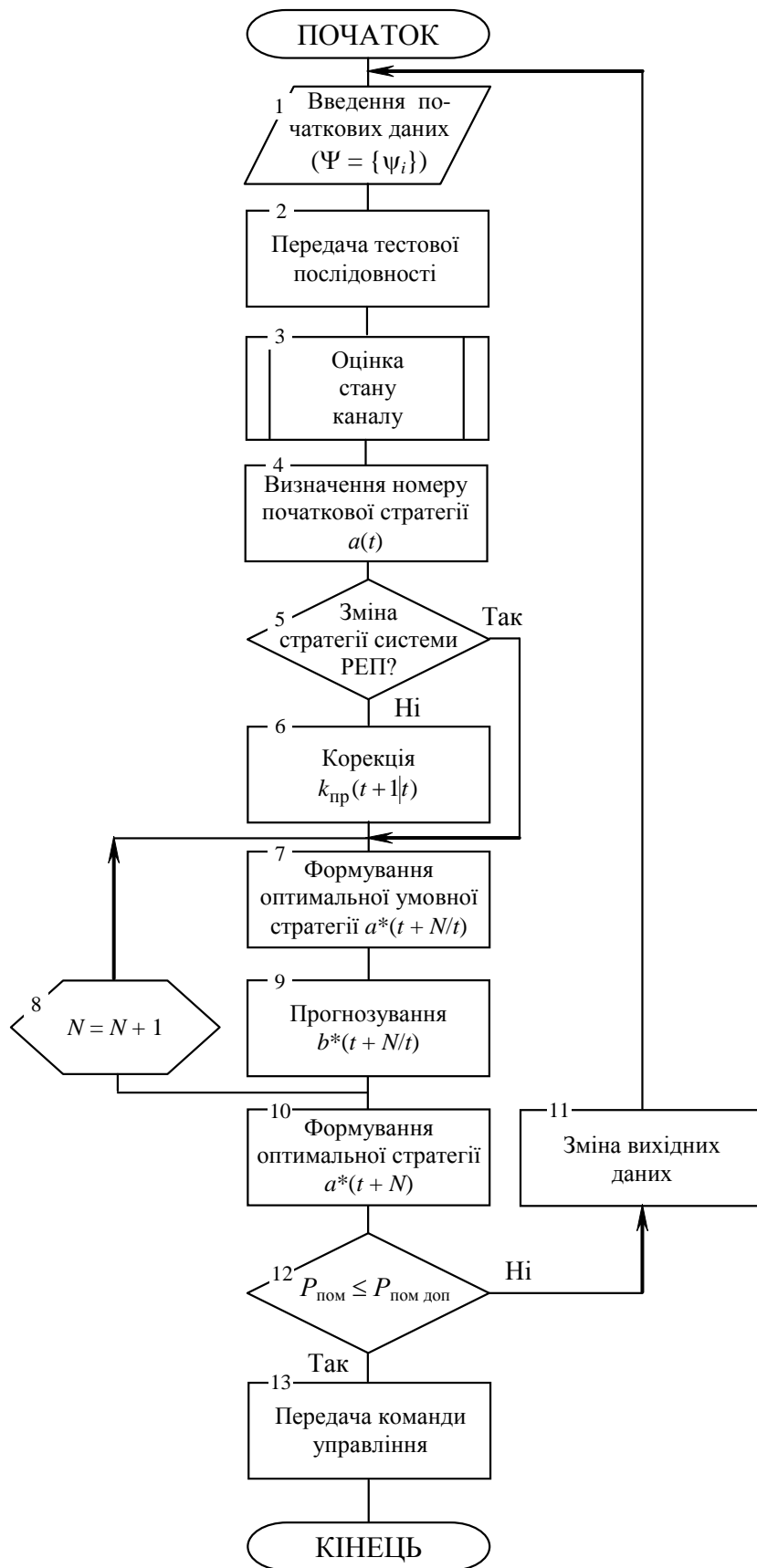


Рис. 3. Схема алгоритму реалізації методики вибору стратегій системи радіозв'язку на базі теорії ігор

Введення вихідних даних. Вводяться параметри засобів радіозв'язку і каналу зв'язку $\psi = \{\psi_i\}$, а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів $P_{\text{помдоп}}$.

Отримання інформації про дії системи РЕП. За допомогою одного з методів контролю стану каналу зв'язку СРЗ [8, 9] визначає стратегію або розпізнає факт дії на неї системи РЕП. Факт впливу системи РЕП на СРЗ може бути виявлений, наприклад, за співвідношенням сигнал/завада.

Визначення номеру варіанта поточної стратегії СРЗ. На основі розрахунків отриманих на етапі проектування СРЗ визначається початкова стратегія (початкові параметри) СРЗ відповідно до характеристик каналу зв'язку.

Визначення оптимальної стратегії СРЗ. Завдання параметричної оптимізації алгоритмів функціонування СРЗ полягає у визначенні такої оптимальної стратегії $a^* \in A^*$, при якій забезпечується максимальна ефективність функціонування СРЗ протягом необхідного часу функціонування [10-12].

Для підвищення ефективності при вирішенні динамічних ігор використовується метод прогнозування.

Одним з можливих рішень ігор у змішаних стратегіях є збільшення швидкості реакції (зниження часу адаптації) однієї зі сторін, що дозволяє підвищити результативність використання стратегій.

З врахуванням трьох етапів циклу управління (контроль, ідентифікація і регулювання) визначимо критерії оптимізації k_a СРЗ, що бере участь у формуванні елементів ігрової матриці, на кожному етапі. Скороченню часу контролю буде сприяти зменшення кількості елементів вектора інформаційних параметрів h , що використовуються в ідентифікації та не впливають на якість контролю, а також зниження частоти сканування параметрів, які змінюються повільно.

Час ідентифікації, що включає розрахунок елементів і рішення матричної гри, можна скоротити за рахунок реалізації принципу прогнозування і визначення обмеженої кількості найбільш імовірних стратегій системи РЕП, завдяки чому розмірність ігрової матриці скорочується. Відповідно знижується і кількість елементарних обчислювальних операцій.

Крім того, частина часу ідентифікації може сполучатися з контролем і регулюванням параметрів. У цьому випадку етап регулювання для заздалегідь спрогнозованої стратегії системи РЕП може починатися при наявності перших даних контролю про зміну стратегії системи РЕП.

Коефіцієнт адаптації СРЗ залежить від співвідношення $T_{\text{ВСРЗ}}, T_{\text{РЕП}}$ а значення $T_{\text{ВСРЗ}}, T_{\text{РЕП}}$ – від тривалостей часу регулювання і зміни режимів роботи засобів радіозв'язку, які залежать від їх стану в попередньому циклі.

Тривалість переходу СРЗ зі стану H_n у стан H_m на етапах регулювання (H_n і H_m вектори станів засобів радіозв'язку) задається заздалегідь відомою квадратною матрицею часу переходу з будь-якого можливого (узятого з області визначення) стану в будь-яке можливе. Тоді процес переходу з H_n в H_m з врахуванням можливих проміжних станів може бути описаний апаратом однорідних марковських кіл з дискретними станами в дискретному часі. Порядок переходу від $H_n(t)$ до $H_m(t+1)$ задається відповідною стратегією $a_i \in S_{\text{СРЗ}}$. Аналогічний стан системи РЕП при переході визначається як $H_{\text{РЕП}n}(t)$ і $H_{\text{РЕП}m}(t+1)$.

Тому задача умовної оптимізації часу адаптації на етапі регулювання полягає у виборі такої стратегії a^* на циклі $(t+1)$, при якій:

$$\begin{aligned} T_{\text{CP3}}((t+1), a^*) &= \min_{a_i \in S_{\text{CP3}}} T_{\text{CP3}}(H_n(t), H_m(t+1), a_i); \\ T_{\text{РЕП}}((t+2), a^*) &= \max_{a_i \in S_{\text{CP3}}} T_{\text{РЕП}}(H_{\text{РЕП}n}(t+1), H_{\text{РЕП}m}(t+2), a_i) \end{aligned} \quad (3)$$

за умови $T_{\text{CP3}} < T_{\text{РЕП}}$.

Чисельно точність передбачуваного значення функції виграшу задається деяким коефіцієнтом помилки прогнозування

$$k_{\text{np}}(t+1|t) = \frac{\hat{\Phi}(t+1)}{\Phi_{RL}(t+1)},$$

де $\Phi_{RL}(t+1)$ обчислена при досягненні $(t+1)$, у результаті моніторингу. Так, у випадку незмінної протягом ряду циклів стратегії система РЕП при $\Phi(t)$, відбувається корекція $\Phi_{RL}(t+1)$ за рахунок $k_{\text{np}}(t+1|t)$, що входить до складу коефіцієнту $\beta_m(t+1)$. Це усуває систематичну помилку в розрахунках значень $\Phi(t)$ і деякою мірою впливає на вибір $a^*(t+1)$ у ході рішення матричної гри.

Чисельно ступінь інформованості сторін може бути виражений у вагових коефіцієнтах інформованості: $1 \leq k_{\text{inf}}^a \leq k_{\text{inf}}^S$ і $1 \leq k_{\text{inf}}^b \leq k_{\text{inf}}^S$, відповідно, ВСПЗ і система РЕП. Показник k_{inf}^S відповідає повній інформованості про гру. Оскільки коефіцієнт помилки прогнозування перебуває у зворотній залежності від k_{inf}^a , функція $f(k_{\text{inf}}^a) = |k_{\text{np}}(t+1|t) - 1|$. У цьому випадку має місце постановка наступної задачі умовної оптимізації:

$$k_{\text{inf}}^a \rightarrow \max,$$

де $\max k_{\text{inf}}^a = k_{\text{inf}}^S$ при обмеженні:

$$|k_{\text{np}}(t+1|t) - 1| \leq \delta_{\text{пом}}, \quad (4)$$

де $\delta_{\text{пом}}$ – деяка центрована випадкова величина з нульовим математичним очікуванням і дисперсією δ^2 , яка визначає деяке граничне значення помилки.

Розглянемо алгоритм рішення матричних ігор, що використовує метод динамічного програмування. Стосовно до розглянутих випадків довгострокове прогнозування дозволяє з досить великим ступенем надійності обмежити кількість ймовірних стратегій системи РЕП у наступних циклах управління до 1...3. Рішенням матричної гри з урахуванням принципу прогнозування на основі марківського підходу є оптимізація умовної стратегії СПЗ на N циклів вперед по прогнозованій стратегії системи РЕП. Очевидно, що з ростом N , точність прогнозування знижується. У зв'язку із цим розглянемо випадок, коли $N = 1$. Можна виділити три етапи алгоритму формування оптимальної стратегії СПЗ.

На першому етапі на основі інформації про поточний стан засобів радіозв'язку, передбачуваного значення перехідних ймовірностей СПЗ, застосованої на циклі управління t стратегії системи РЕП $b(t)$, а також з врахуванням попередніх стратегій системи РЕП формується оптимальна умовна стратегія $a^*(t+1|t)$:

$$a^*(t+1|t) = \arg \max_{a \in S_{\text{CP3}}} P(a(t), b(t), H(t)) . \quad (5)$$

На другому етапі вирішується завдання прогнозування стратегії, яка використовується на циклі управління $t+1$ системою РЕП і яка забезпечить мінімізацію функціонала

$$b^*(t+1|t) = \arg \min_{b \in S_{РЕП}} P(a^*(t+1), b(t+1)) \quad (6)$$

На третьому етапі формується оптимальна стратегія управління СРЗ з врахуванням прогнозованої стратегії системи РЕП і поточного стану засобів радіозв'язку:

$$a^*(t+1|t) = \arg \max_{a \in S_{СРЗ}} P(a(t+1), b^*(t+1|t), H(t+1), \beta_m(t+1), k_a(H(t+1)|H(t))) \quad (7)$$

Для підвищення надійності результату алгоритм (4.50)-(4.52) може повторюватися обмежену кількість разів при наявності певної дисперсії розподілу ймовірностей застосування $a_1^*(t+1|t) \dots a_n^*(t+1|t)$ з їх наступною оцінкою на основі критеріїв переваги, що вводяться. У випадку неможливості визначення такої $a^*(t+1)$, при якій втрати не перевищують припустимого значення вирішується завдання розширення множини допустимих стратегій СРЗ, після чого знову визначається $a^*(t+1)$. Аналогічно формуються стратегії СРЗ шляхом оптимізації умовної стратегії управління СРЗ по прогнозованій на N кроків стратегії системи РЕП. Третій етап алгоритму в цьому випадку буде мати вигляд:

$$a^{*(N)}(t+N) = \arg \left[\max_{a \in S_{СРЗ}} P(a(t+N), b^*(t+N|t+N-1), H(t+N), \beta_m(t+N), k_a(H(t+N)|H(t+N-1))), \quad N = 1, 2, 3 \dots \right]$$

Апарат марківських кіл використовується на другому і третьому етапах, що дозволяє розраховувати ймовірності застосування тієї або іншої стратегії на черговому циклі управління і вибору оптимальної стратегії.

Відповідно до принципу оптимальності [12], при пошуку оптимального рішення в багатокроковому завданні оптимізації вибір стратегії управління $a(t)$ на кожному кроці незалежно від початкового стану повинен бути спрямований на оптимізацію не тільки даного, але і всіх наступних кроків.

Таким чином, у процесі умовної оптимізації з врахуванням поточної ігрової матриці будуть формуватися умовно оптимальні стратегії, що визначають фазову траєкторію СРЗ, починаючи із заключного циклу прогнозування $t = N$ до поточного значення t .

У цьому випадку в кожному циклі управління потрібне рішення оптимізаційної задачі, яка має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} k_{inf}^a \rightarrow extr = k_{inf}^F \quad \text{при умові } n(h_n) \leq n_{доп}, \quad m(h_m^I) \leq m_{доп} \\ \frac{T_{СРЗ}}{T_{РЕП}} \rightarrow \min \quad \text{при умові } T_{СРЗ} < T_{РЕП} \frac{k_a(t)}{\alpha}, \quad k_{a(\min)} \leq k_a(t) \leq k_{a(\max)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Основним обмеженням в (8) є $k_{a(\min)} \leq k_a(t) \leq k_{a(\max)}$. Коефіцієнт адаптації обмежений знизу мінімальною тривалістю перехідних процесів регулювання і обчислювальною потужністю центрального процесору, зверху – мінімальною тривалістю циклу управління системи РЕП.

Перевірка поточного значення ймовірності помилкового приймання сигналу. У процесі функціонування адаптивної СРЗ за ігровим алгоритмом здійснюється перевірка поточного значення ймовірності помилкового приймання сигналу і порівняння його із заданим значенням ($P_{пом} \leq P_{пом доп}$).

Формування команд управління СРЗ. В залежності від результатів прогнозування формуються команди управління автоматизованої адаптації для зміни параметрів і режимів роботи СРЗ.

Висновки

Новизна запропонованої методики полягає в застосуванні при формуванні оптимальної стратегії СРЗ прогнозування на N циклів вперед.

Результати імітаційного моделювання процесу функціонування СРЗ за запропонованим ігровим алгоритмом показав, що додаткове застосування прогнозування стратегії на N циклів вперед дозволяє підвищити завадозахищеність системи на 7-12 %.

Аналіз виграшу, який отримує СРЗ в різних ситуаціях, показав, що теорія ігор не тільки дозволяє сформулювати оптимальну стратегію, що забезпечує гарантії певного виграшу, але і дозволяє видати рекомендації по її зміні з метою збільшення виграшу, якщо система РЕП відступає від своєї оптимальної стратегії. Коли система РЕП слідує своїй оптимальній стратегії, теорія ігор дозволяє оцінити цю ситуацію.

Якщо результати оцінки не влаштовують, то необхідно вживати заходи по зміні ситуації: збільшувати потужність передавача, застосовувати інші сигнали, змінювати режим роботи.

Література

1. Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США «Профет» / А. Кондратьев // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 7. – С. 22–28.
2. Азов В. О реализации в США концепции ведения военных действий в едином информационном пространстве / В.О. Азов // Зарубежное военное обозрение. – 2004. – № 6. – С. 10-17.
3. Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиоэлектронной войны «Вулфпак» / А. Стрелецкий // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 10. – С. 27-28.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз; ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
5. Шаров А. Н. Автоматизированные сети радиосвязи / А.Н. Шаров. – Л.: ВАС, 1988. – 178 с.
6. Борисов В. И., Зинчук В. М., Николаев В. И. и др. Системы радиосвязи с расширением спектра сигналов (аналитический обзор) / В.И. Борисов, В. М.Зинчук, В. И. Николаев // Теория и техника радиосвязи, 1998. – Вып. 1. – С. 18-48.
7. Радзиевский В. С., Сирота А. А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта / В. С. Радзиевский, А. А Сирота. – М: ИПРЖР, 2001.
8. Міночкін Д. А. Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями / Д. А. Міночкін, І. В. Борисов // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 66–71.
9. Коричнев Л. П. Статистический контроль каналов связи / Л. П. Коричнев, В. Д. Королев. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
10. Оуэн Г. Теория игр / Г. Оуэн. – М.: Мир, 1971. – 230 с.
11. Петросян Л. Теория игр / Л. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.А. Семина. – М.: Высшая школа, 1998. – 304 с.
12. Стеклов В. К. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку : підр. для вищ. навч. закл / В.К. Стеклов. – К.: Техніка, 2004. – 576 с.

Надійшла 05.06.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Толюпа С.В.