

УДК 621.391

Р. М. ЖИВОТОВСЬКИЙ,*кандидат технічних наук**(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)*

Аналіз методів оцінки каналів управління та передачі даних комплексів протиповітряної оборони

Проведений аналіз відомих методів оцінки стану каналів управління та передачі даних комплексів протиповітряної оборони, що функціонують в умовах активного радіоелектронного подавлення. Проаналізовані недоліки та переваги відомих методів.

Ключові слова: радіоелектронна обстановка, навмисні завади, протиповітряна оборона, методи аналізу.

Проведен анализ известных методов оценки состояния каналов управления и передачи данных комплексов противовоздушной обороны, которые функционируют в условиях активного радиоэлектронного подавления. Проанализированы недостатки и преимущества известных методов.

Ключевые слова: радиоэлектронная обстановка, преднамеренные помехи, противовоздушная оборона, методы анализа.

Завадозахищеність приймання сигналів у сучасних комплексах протиповітряної оборони (ППО), що функціонують у складній радіоелектронній обстановці [1], значною мірою залежить від точності оцінки стану їхніх каналів управління та передачі даних, яка визначається передаточною характеристикою [1–3]. При наявності об'єктивної та точної інформації про стан каналів передачі даних є можливість здійснювати заходи, спрямовані на підвищення завадозахищеності функціонування комплексів ППО.

Тому **метою** статті є проведення аналізу існуючих методів оцінювання стану каналів управління та передачі даних комплексів ППО в умовах радіоелектронного подавлення та багатопроменевого поширення радіохвиль.

Для вирішення наукової задачі використані методи аналізу та синтезу складних технічних систем, теорії завадозахищеності радіотехнічних систем та методи математичного моделювання.

Задача оцінки передаточної характеристики каналів управління та передачі даних може бути подана як знаходження значень їх імпульсної характеристики або відповідей значень частотної характеристики.

Необхідність забезпечення високої точності оцінки каналів обмежує ефективність практичного застосування сучасних комплексів ППО. Уникнути даної проблеми можна за допомогою розробки робастних відносно помилок оцінювання каналів алгоритмів приймання. Однак такий підхід, як показано в [4], не завжди здатний забезпечити задовільні результати, і, як правило, призводить до істотного ускладнення радіоелектронного обладнання.

Визначення структури і параметрів систем за спостереженнями є одним з основних завдань сучасної теорії і техніки автоматичного управління. Це завдання виникає при вивченні властивостей і особливостей об'єктів з метою подальшого управління ними, і, як наслідок, створення адаптивних систем, в яких на основі ідентифікації об'єкта виробляються оптимальні управляючі впливи.

Під ідентифікацією розуміють визначення структури системи та її параметрів шляхом аналізу вхідних і вихідних даних даної системи [3–5]. Головним завданням ідентифікації є визначення кращої в деякому розумінні оцінки характеристики об'єкта.

Розрізняють *параметричну* та *непараметричну* ідентифікацію.

При використанні методів параметричної ідентифікації відразу визначаються коефіцієнти передаточної функції або рівняння об'єкта. Друга група методів використовується для визначення часових або частотних характеристик об'єктів, а також характеристик випадкових, генерованих об'єктами процесів. За отриманими характеристиками визначаються передаточна функція або рівняння об'єкта.

Розглянемо спочатку докладніше методи **непараметричної ідентифікації**.

Визначення передаточної функції за часовими характеристиками об'єкта. Як відомо, диференціальні рівняння і передаточна функція є найбільш загальними формами зв'язку між змінними стану на вході і виході

лінійної системи. Великого поширення набули методи ідентифікації детермінованих об'єктів шляхом визначення перехідної характеристики $h(t)$ за кривою розгону при ступінчастій зміні управління на вході:

$$h(t) \approx \frac{y(t) - y_0}{u - u_0}, \quad (1)$$

де $y(t)$ – зміна вихідної величини об'єкта при подачі на його вхід ступінчастого управління u (крива розгону), y_0 і u_0 – значення виходу і входу об'єкта до початку проведення експерименту.

Якщо об'єкт управління не допускає зміни вихідної координати, то на його вхід замість ступінчастої дії подають одиничний імпульс або серію імпульсів.

Визначення передаточної функції за частотними характеристиками об'єкта. Сутність методу полягає в тому, що спочатку експериментально знімають частотні характеристики об'єкта, а потім за отриманими експериментальними характеристиками розраховують передаточну функцію. При знятті частотних характеристик використовують такі методи впливу на об'єкт, як метод синусоїдальної хвилі та метод „прямокутної” хвилі [7–9].

Основним недоліком розглянутих методів є тривалий час експерименту, що витрачається, в основному, на очікування сталого режиму коливань і отримання достатніх для апроксимації частотних характеристик значень.

Кореляційний метод ідентифікації. Вихідні змінні об'єкта $y(t)$ визначаються не тільки детермінованими керуючими вхідними сигналами $u(t)$, але і некерованими впливами (завадами) $e(t)$, що можуть мати місце і викликати відхилення вихідних змінних від заданих значень. Щоб отримати рівняння зв'язку між статистичними характеристиками входу і виходу для стаціонарних ергодичних процесів, користуються їх статистичними характеристиками і, зокрема, кореляційними функціями або спектральною щільністю ймовірностей. Для підвищення точності оцінок кореляційних функцій необхідно правильно вибирати інтервал спостереження сигналів, для яких оцінюються ці кореляційні функції.

Ідентифікація параметрів об'єкта спектральним методом. Спектральні методи ідентифікації засновані на використанні апарату матричних операторів. Ці методи є подальшим розвитком частотних методів і ґрунтуються на розкладанні сигналів об'єкта за ортонормованими функціями, не обов'язково гармонійними. Результатом ідентифікації є визначення ядра інтегрального рівняння об'єкта, яке в простому випадку лінійних одновимірних систем співпадає з функцією ваги. Спектральні методи можуть застосовуватися для ідентифікації нестационарних систем, параметри яких, зокрема ядро інтегрального рівняння, змінюються в часі.

У комплексах ППО значно більшого поширення набули методи **параметричної ідентифікації** [10]. Параметрична ідентифікація дозволяє відразу знаходити значення коефіцієнтів моделі об'єкта за вимірюваними значеннями керованих y і керуючих u сигналів об'єкта.

При цьому вважається, що структура і порядок моделі об'єкта відомі.

Важливою перевагою методів параметричної ідентифікації є можливість використання рекурентних алгоритмів, що дозволяють проводити поточну ідентифікацію в реальному часі при номінальних режимах роботи об'єкта. До таких методів відносяться: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності і метод стохастичної апроксимації.

Метод найменших квадратів (МНК) [10]. Використання звичайного МНК при впливі корельованих у часі шумів, тобто при мінімізації функції втрат за критерієм найменших квадратів, викликає зміщення оцінок параметрів – збільшення дисперсії даних оцінок. Погіршення цих оцінок призводить до зниження якості управління. Для отримання незміщених оцінок використовується узагальнений МНК (УМНК). При використанні УМНК оцінюються параметри моделей об'єкта і шуму на його виході.

Даний метод застосовується при великих відношеннях сигнал/шум, оскільки при малих відношеннях він дає значне зміщення оцінок параметрів. Перевагою методу є те, що надійна збіжність оцінок вимагає відносно невеликого обсягу обчислень.

Метод допоміжних змінних [10]. Метод допоміжних змінних (МДЗ) використовується тоді, коли існує кореляція між шумом $e(k)$ і елементами вектора даних $\Psi(k+1)$, і моделі об'єкта та шуму подані у вигляді повної моделі (3). Алгоритм ідентифікації за методом допоміжних змінних аналогічний алгоритму МНК. Для реалізації алгоритму вводять вектор допоміжних змінних. МДЗ дозволяє обчислити тільки оцінки параметрів об'єкта ідентифікації.

Метод забезпечує досить точну оцінку параметрів. Він використовується при високій інтенсивності завад і їхньої кореляції зі змінними об'єкта. Для прискорення збіжності оцінок на початковому етапі рекомендується використовувати рекурентний МНК. Недоліком є великий обсяг обчислень.

Метод стохастичної апроксимації [10]. Метод стохастичної апроксимації (МСА) розроблено для визначення коренів рівняння, якщо значення функції при заданому значенні аргументу спостерігаються при наявності завади. МСА організовує деяку послідовність рішень для знаходження оцінки вектора параметрів при кожному вимірюванні $\hat{\theta}(k)$ таку, що

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{\theta}(k) = \theta. \quad (2)$$

МСА легко переноситься на завдання визначення параметрів у стохастичних системах в умовах послідовного отримання оцінок (рекурентна ідентифікація).

Недолік МСА – повільна збіжність оцінок $\hat{\theta}(k)$, навіть якщо дисперсія $e(k)$ є істотно меншою за дисперсію $y(k)$. Не дивлячись на повільну збіжність оцінок, алгоритми МСА завдяки своїй простоті знаходять застосування в практичних задачах ідентифікації лінійних і нелінійних моделей об'єктів з незалежним адитивним шумом.

Прийнятна точність оцінки при використанні методу досягається при дуже великому числі вимірювань. При малих обсягах обчислень і шумах високої інтенсивності всі методи (окрім МСА) мають однакову якість оцінок, отже перевагу віддають РМНК, оскільки він простіший за інші й гарантує збіжність оцінок. Перевага РММП проявляється при великих об'ємах вимірювань.

Робастний метод оцінювання [10]. Робастне оцінювання полягає в застосуванні ідей ММП у ситуації, коли форма або параметри розподілу, на якому заснований метод, визначені не повністю. Невизначеність виду розподілу можна описати за допомогою введення параметра, що належить множині Ξ . Тоді замість щільності, що фігурує в ММП, з'являється умовна щільність $p(y | \tau, \xi)$. Рішення задачі полягає у виборі «найгіршого» в множині Ξ значення ξ^* , параметра ξ з подальшим використанням ММП, заснованого на щільності $p(y | \tau, \xi^*)$. Саме ця ідея отримала визнання і розвитою

тот і відома як *робастне оцінювання, або стабільний ММП* [12].

Метод максимальної ентропії (Берга) [10]. Метод максимальної ентропії Берга [5, 10] відноситься до категорії параметричних методів спектрального аналізу. У подібних методах у відповідність до досліджуваного процесу задається завжди апіорна модель спектральної щільності і ставиться завдання оцінки параметрів моделі на основі аналізу досліджуваного часового ряду. У методі Берга використовується варіаційний принцип, і для оцінки якості моделі шукається процес з максимальною ентропією або процес, спектр якого відповідає найбільш випадковому часовому ряду, причому кореляційна функція цього ряду повинна найкращим чином збігатися із заданою послідовністю. Оцінка спектральної щільності в методі Берга аналогічна оцінці за допомогою авторегресійної моделі першого порядку з вхідним білим шумом. Метод Берга має, мабуть, найвище спектральне розрізнення серед усіх спектральних методів.

До недоліків методу слід віднести відсутність точної інформації про величини амплітуд і фаз виявлених гармонік, а також необхідність попереднього підбору порядку параметра авторегресії, тому що при великих параметрах, що чисельно перевищують половину довжини ряду, оцінки за цим методом можуть бути нестабільними і, зокрема, може відбуватися розщеплення спектральних компонент. Відзначимо також, що метод не призначений для роботи з простими гармонійними сигналами.

Нижче розглянуті алгоритми оцінки каналів, побудовані на застосуванні розглянутих методів ідентифікації.

Алгоритм оцінки параметрів каналу з використанням точно відомих (пілотних) і невідомих інформаційних символів [10]. Оцінка найменших квадратів і зважена оцінка за мінімумом квадратів помилок ІХ каналу за тестовими символами має вигляд

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МНК}} = (\mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{y}, \quad (3)$$

де \mathbf{X}_p^H – матриця відліків з пілотними сигналами й імпульсною характеристикою, \mathbf{W} – матриця відліків адитивного шуму з нульовим середнім значенням і кореляційною матрицею $\mathbf{R}_w = E\{\mathbf{w} \mathbf{w}^H\}$, \mathbf{X}_p – матриця відліків з пілотними сигналами.

Складність алгоритму оцінювання за допомогою пілотних символів невисока, оскільки матриця $(\mathbf{X}_p^H \mathbf{W} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{W}$ відома і може бути обчислена заздалегідь не в реальному масштабі часу з будь-якою необхідною точністю. За відсутності апіорної інформації про символи, що передаються, оцінка ІХ завжди буде нульовою, тому практично вказані способи оцінки можуть використовуватися тільки при ітеративному алгоритмі прийому на всіх ітераціях, окрім першої, будучи альтернативою запропонованому нижче МП алгоритму.

Перевагою розглянутого алгоритму оцінювання є те, що він не вимагає знання статистики шуму ні в якій формі. Алгоритми, що розглядаються далі, цією властивістю не володіють.

Середньоквадратичне відхилення оцінки (СКВ) є зручною характеристикою її якості. Відомо, що з цього погляду кращою оцінкою буде мінімальне середньоквадратичне відхилення оцінки (МСКВ), що є апостеріорно середнім. У разі, коли \mathbf{h} і \mathbf{y} гаусівські, його можна отримати таким чином:

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \bar{\mathbf{h}} + \mathbf{R}_{\mathbf{h}\mathbf{y}} \mathbf{R}_y^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{h}}), \quad (4)$$

де $\bar{\mathbf{h}} = E\{\mathbf{h}\}$, $\mathbf{R}_{\mathbf{h}\mathbf{y}} = E\{(\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})(\mathbf{y} - E\{\mathbf{y}\})^H\}$.

Методи оцінювання каналів при ітеративних способах обробки сигналу на прийомі [10]. МП алгоритм оцінювання вектора відліків ІХ. МП алгоритм – це спосіб ітеративного максимально правдоподібного оцінювання, зручний у випадку, коли є невідомі супутні параметри, наприклад інформаційні символи [6–11].

Ключова ідея МП алгоритму полягає в такому виборі повного набору даних \mathbf{z} , щоб інтеграція і максимізація могли б бути легко виконані. Основна властивість даного алгоритму полягає в тому, що $p(y | \hat{\Theta}_{\text{МП}}^{(i+1)}) \geq p(y | \hat{\Theta}_{\text{МП}}^{(i)})$, тобто функція правдоподібності монотонно зростає на кожному подальшому етапі оцінки. У загальному випадку МП алгоритм сходиться до локального максимуму функції правдоподібності $p(y | \Theta)$. Здатність досягнення глобального максимуму залежить від початкових умов. Швидкість збігу залежить від вибору повної множини даних \mathbf{z} .

Основна складність розрахунку полягає у використанні апостеріорної функції щільності розподілу ймовірності, що вводить статистичну залежність між ітераціями і зрештою призводить до залежності величини зміщення від початкових умов.

Субоптимальний алгоритм ітераційного оцінювання каналу та інформаційних символів на основі МП алгоритму [10]. МП алгоритм заснований на використанні апостеріорної інформації про інформаційні символи, отже його використання в ітераційних процедурах

прийому вимагає їх реініціалізації після кожного циклу оцінки \mathbf{h} , тобто обнулення „зовнішньої” інформації всіх модулів, що подається по каналах зворотного зв'язку на входи для апіорної інформації всіх модулів обробки. Це істотно збільшує кількість ітерацій i , як наслідок, обсяг обчислювальних витрат. Якщо не проводити реініціалізацію алгоритму прийому після кожного циклу оцінки, то будуть порушені турбопринципи, і сам алгоритм оцінки вже не буде МП алгоритмом. Проте цей прийом приведе до істотного скорочення обсягу обчислень, тому застосування даного підходу цілком заслуговує на увагу.

Лінійна незміщена оцінка з мінімальною дисперсією (ЛНО) [10]. Дана оцінка обчислюється як $\hat{\mathbf{h}}_{\text{ЛНО}} = \mathbf{A}\mathbf{y}$, де матриця \mathbf{A} вибирається такою, щоб оцінка була незміщеною і СКВ помилки оцінки кожного елемента вектора \mathbf{h} була б мінімальною при оцінці тільки з використанням відомих тестових символів $\mathbf{A} = (\mathbf{X}_p^H \mathbf{R}_w^{-1} \mathbf{X}_p)^{-1} \mathbf{X}_p^H \mathbf{R}_w^{-1}$.

При оцінюванні з використанням інформації, що міститься в невідомих інформаційних символах

$$\mathbf{A} = (E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \} \mathbf{R}_\Sigma^{-1} E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \})^{-1} E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \} \mathbf{R}_\Sigma^{-1}, \quad (5)$$

де

$$\mathbf{R}_\Sigma = \mathbf{R}_w + E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \mathbf{h} \mathbf{h}^H \mathbf{X}^H \} - E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \} \mathbf{h} \mathbf{h}^H E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \}. \quad (6)$$

Як видно з формули (6), для оцінювання потрібно знати \mathbf{h} . Як \mathbf{h} може використовуватися попередня оцінка $\hat{\mathbf{h}}$, наприклад, отримана на попередній ітерації, а на першій ітерації – оцінка, отримана за допомогою якого-небудь з методів, що не вимагають апіорної інформації. Якщо є апіорна інформація про \mathbf{h} у формі $p(\mathbf{h})$, то

$$\mathbf{A} = (E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \} (E_h \{ \mathbf{R}_\Sigma \})^{-1} E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \})^{-1} E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \} (E_h \{ \mathbf{R}_\Sigma \})^{-1}. \quad (7)$$

На відміну від попередніх способів оцінки даних метод вимагає обов'язкової наявності апіорної інформації про канал і знання статистики шуму (у загальному випадку – у вигляді його кореляційної матриці \mathbf{R}_w).

Лінійне оцінювання за мінімумом середньоквадратичного відхилення (МСКВ) [10]. Така оцінка визначається як $\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \mathbf{A}\mathbf{y} + \mathbf{b}$, де матриця \mathbf{A} і вектор \mathbf{b} обираються так, щоб оцінка була незміщеною і мала мінімальну помилку для кожного компонента вектора \mathbf{h} .

Якщо $E_h \{ \mathbf{h} \} = \bar{\mathbf{h}}$ і $E \{ (\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})(\mathbf{h} - \bar{\mathbf{h}})^H \} = \mathbf{R}_h$, то

$$\hat{\mathbf{h}}_{\text{МСКВ}} = \bar{\mathbf{h}} + \mathbf{R}_h E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \} (E_h \{ \mathbf{R}_\Sigma \} + E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \} \mathbf{R}_h E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \})^{-1} (\mathbf{y} - E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \} \bar{\mathbf{h}}), \quad (8)$$

де \mathbf{R}_Σ обчислюється за (6) і, відповідно,

$$E_h \{ \mathbf{R}_\Sigma \} = \mathbf{R}_n + E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \mathbf{R}_h \mathbf{X}^H \} - E \{ \mathbf{X} \} \mathbf{R}_h E \{ \mathbf{X}^H \} + E \{ \mathbf{X} \bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H \mathbf{X}^H \} - E_x^{(e)} \{ \mathbf{X} \} \bar{\mathbf{h}} \bar{\mathbf{h}}^H E_x^{(e)} \{ \mathbf{X}^H \}.$$

На відміну від ЛНО оцінка (8) можлива за відсутності інформації про інформаційні символи, тобто при $E \{ \mathbf{X} \} = 0$.

Так само як і в разі ЛНО, дане оцінювання може використовувати наявну апіорну інформацію про канал (зберігаючи працездатність у разі її відсутності) і вимагає знання статистики шуму (у загальному випадку – кореляційної матриці шуму \mathbf{R}_w).

Таким чином, можна зробити такі **висновки**:

1. При наявності достатньої апіорної інформації про інформаційні символи, що передаються, кращі результати за критерієм співвідношення точності оцінки і складності реалізації демонструє алгоритм лінійного оцінювання за мінімумом СКВ.

2. За відсутності достатньої апіорної інформації про символи, що передаються, кращим є незміщений варіант оцінки за мінімумом найменших квадратів.

3. Для підвищення точності оцінювання передаточної характеристики каналів комплексів ППО в умовах складної радіоелектронної обстановки доцільно використовувати ітеративні принципи.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку комбінованого методу оцінки стану каналів комплексів ППО в складній радіоелектронній обстановці.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.
2. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации. М. : Наука. Физматлит, 1995. 336 с.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 301 с.
4. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применение. М. : Наука, 1968. 548 с.
5. Нечаев Ю. Б., Малютин А. А. Методы оценки параметров многолучевого канала связи при итеративных алгоритмах приема // Теория и техника радиосвязи. 2009. Вып. 2. С. 35–43.
6. Уоткинс Д. Основы матричных вычислений. М. : Бином, 2006. 664 с.
7. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М. : Сов. радио, 1986. 368 с.
8. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. М. : Мир, 1976. 756 с.
9. Бриллинджер Д. Временные ряды. М. : Мир, 1980. 536 с.
10. Савараги Е., Созда Т., Накимозо Т. “Классические” методы и оценивание временных рядов. М. : Мир, 1983.
11. Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis, Ph.D. Dissertation. Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, Calif, May 1975.
12. Савченко В. В. Обнаружение и прогнозирование разладки случайного процесса на основе спектрального оценивания // Автометрия. 1996. № 2. С. 77–84.

Рецензент О. В. Крилов, старший науч. співробітник (Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України)