

ОЦІНКА ЯКОСТІ РОБОТИ РАДІОТЕХНІЧНИХ СТАНЦІЙ ПРИ ВИЯВЛЕННІ ТА СУПРОВОДІ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

І.Г. Лисаченко, О.М. Роянов, Б.О. Чумак
(Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків)

Отримані співвідношення, які визначають якість роботи радіотехнічних станцій (РТС) в залежності від похибок даних балістичного забезпечення (БЗ) в умовах роботи останньої на етапах первинного пошуку і виявлення космічного апарату (КА) та подальшого його супроводу вздовж орбіти польоту.

радіотехнічна станція, балістичне забезпечення, космічний апарат

Вступ. Для спостереження та супроводу КА та інших космічних об'єктів (КО) потрібна мережа наземних РТС, за допомогою яких забезпечується контроль орбіт та здійснюється управління їх польотом. Обробка траєкторної інформації дозволяє виконати прогноз руху КА на певний період та видати команди для корекції орбіти. При цьому для одержання зазначеної інформації здійснюється первинний пошук та подальший безперервний супровід КА за частотно-часовим та просторовим полями.

Аналіз літератури [1 – 8] показує, що система супроводу КА має ряд характеристик, які визначають якість роботи комплексу “Наземна РТС – КА”, та відповідають основним вимогам щодо класу визначених систем. Однією з таких характеристик системи супроводу є в першу чергу її точність за певних умов роботи.

У статті [1] була розглянута розроблена модель функціонування системи управління КА. При проведенні детального аналізу даної моделі можна зробити висновок, що основними компонентами такої системи є підсистеми радіоконтролю і управління та балістичного забезпечення (БЗ), а сам процес визначення параметрів руху КА є поетапним. Інформація, яка надійшла про супроводжуваний КА обробляється таким чином, що визначається похибка між цілевказівками (ЦВ) та вимірами. Це необхідно для вирішення задач балістичного забезпечення щодо контролю і керування польоту КА із заданими показниками якості. В сучасних та перспективних комплексах після розрахунку похибок вимірів повинна оцінюватись достовірність отриманої інформації щодо руху КА. На підставі такого рішення на КА, який супроводжується, передаватиметься службова інформація з урахуванням відкориго-

ваних ЦВ. Такий підхід дозволяє корегувати одержані виміри по окремим складовим вектору стану, що в свою чергу впливає на підвищення кількості якісних вимірів, які будуть одержані завдяки вірним цілевказівкам на подальший супровід.

Таким чином, при керуванні польотом КА вирішуються задачі радіоконтролю та балістичного забезпечення, які тісно пов'язані між собою, і похибки однієї з них істотно впливають на якість роботи іншої.

Оскільки при контролі і керуванні польоту КА можна відокремити два основних етапи роботи РТС, а саме: *первинний пошук і виявлення* об'єкту за частотно-часовими та просторовими полями; *вимір навігаційних параметрів* руху КА, то необхідно окремо проаналізувати вищевказаний взаємозв'язок роботи підсистем на цих етапах.

Постановка задачі. При первинному пошуку відбитого або сигналу, який випромінює КА, виміри можуть поступати для подальшої обробки з істотними похибками. Подальше накопичення похибок фактично завжди призводить до зриву супроводу КА. В цих умовах ведучу роль відіграє точність даних підсистеми балістичного забезпечення процесу програмного супроводу КА.

1. У цьому зв'язку доцільно оцінити вплив похибок балістичного забезпечення на похибки при первинному пошуку і виявленні сигналу, а також на помилки супроводу КА в подальшому. Для конкретизації рішення цих задач будемо вважати, що пошук, виявлення та програмний супровід КА здійснюється антеною з однопелюстковою діаграмою спрямованості (ДС).

Для здійснення пошуку та виявлення КА за допомогою РТС необхідно мати цілевказівки (балістичні дані), які є апіорною інформацією для визначення вектору стану об'єкту.

Фактично балістичні дані є середньостатистичною оцінкою вектору стану для детермінованих траєкторій об'єктів. Як і будь-яка оцінка визначені дані мають певні похибки. При цьому цілком доцільним буде визначити як впливають дані похибки на функціонування РТС.

Розглянемо типову схему пристрою пошуку і виявлення РТС з ШШС (рис. 1) [3 – 6]. В режимі початкового пошуку сигналу необхідно спрямовувати діаграму спрямованості (ДС) в місце апіорного знаходження об'єкту. Будемо вважати, що модель спостереження уявляється у вигляді

$$y(t) = S(t, \lambda) + n(t), \quad (1)$$

де $n(t)$ – білі гаусові шуми з нульовим середнім і δ -функцією кореляції.

В [2] доведено, що при умові, коли

$$\sqrt{S_0^2 T / (2N_0)} \gg 1, \quad (2)$$

де S_0 – амплітуда корисного сигналу; N_0 – спектральна густина потужності шумів, функція розподілення випадкової величини Z апроксимується гаусівським розподіленням

$$p(Z | S_0 \neq 0, \sqrt{\mu} \gg 1) = \frac{1}{2\pi\sigma_Z} \exp\left\{-\frac{(Z-\alpha)^2}{2\sigma_Z^2}\right\}, \quad (3)$$

де $Z = \sqrt{\left[\frac{K_{\Pi}}{T} \int_0^T U(t)S_0(t, \tau_0, F_{\text{д}}\varphi)dt\right]^2 + \left[\frac{K_{\Pi}}{T} \int_0^T U(t)S_{0\perp}(t, \tau_0, F_{\text{д}}\varphi)dt\right]^2}$; $S_0(\cdot)$ –

опірний сигнал; $\langle Z \rangle = \alpha = \frac{S_0 K_{\Pi}}{2}$; $\sigma_Z^2 = \frac{N_0 K_{\Pi}^2}{4T}$; μ – відношення сигнал/шум; K_{Π} – коефіцієнт підсилювання.

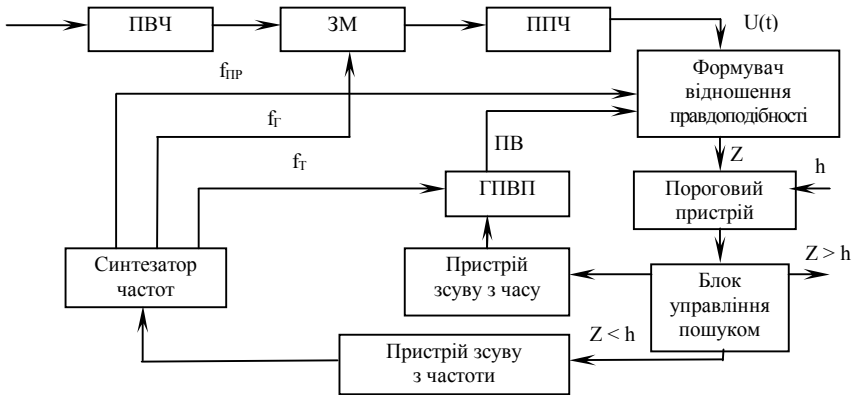


Рис. 1. Структура пристрою пошуку і виявлення ШШС

Згідно критерію Неймана-Пірсона пороговий рівень вирішувального пристрою визначається відповідно заданому значенню ймовірності хибної тривоги

$$P_F = \exp\left(-h^2 / (2\sigma_Z^2)\right). \quad (4)$$

При цьому ймовірність вірного виявлення визначається виразом

$$P_D = \Phi\left(\frac{\alpha - h}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(\sqrt{2\mu} - \sqrt{2\ln\frac{1}{P_F}}\right). \quad (5)$$

Таким чином зазначена ймовірність залежить від відношення сигнал/шум на вході РТС, рівню порогу вирішувального пристрою, а також

середньоквадратичного значення шуму на виході пристрою виявлення.

Тепер припустимо, що цілевказівки мають кутову похибку відносно реального місцезнаходження об'єкту таку, що

$$\delta_{ЦВ} < \Theta_{05}, \quad (6)$$

де Θ_{05} – ширина діаграми спрямованості (ДС) антени РТС на рівні половинної потужності.

Апроксимуємо ДС функцією [7] $\text{Cos}[(\pi/2)(\varphi/\Theta_{05})]$. Тоді при відхиленні дійсного напрямку на об'єкт від напрямку максимуму ДС на кут $\varphi < \Theta_{05}$ відношення сигнал/шум на вході приймального пристрою буде визначатись за співвідношенням

$$\mu = \mu_0 \text{Cos}[(\pi/2)(\varphi/\Theta_{05})], \quad (7)$$

де μ_0 – відношення сигнал/шум при збіганні напрямку на об'єкт з напрямком максимуму ДС.

Припустимо також, що існує зазначена похибка цілевказівки з далькості ΔD (рис. 2).

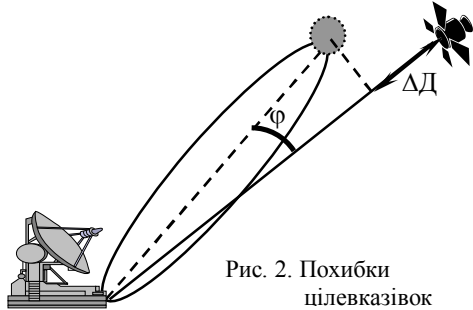


Рис. 2. Похибки цілевказівок

При цьому, як відомо [8], для пошуку сигналу з часової затримки (при достатньо великій базі сигналу, наприклад, псевдовипадкового (ПВП)) застосовується кореляційний пошук, коли опорна послідовність "виставляється" в межах часової зони апріорного з'явлення сигналу. Похибка ΔD при виявленні сигналу буде викликати зменшення корисного сигналу пропорційно величині $(\tau_0 - \Delta\tau)/\tau_0$, де $\Delta\tau = 2\Delta D/C$ (C – швидкість світла), τ_0 – тривалість елементарного символу ПВП. При цьому $\Delta\tau < \tau_0$, оскільки в протилежному випадку не буде прийняття сигналу. Тому бажано, щоб похибки цілевказівки з далькості не перевищували величини $\Delta D = C\tau_0/2$. Таким чином, враховуючи можливі похибки цілевказівки запишемо вираз (5) у вигляді

$$P_D = \Phi\left(\frac{\alpha - h}{\sigma_Z^2}\right) = \Phi\left(\sqrt{2\mu_0} \frac{|\tau_0 - \Delta\tau|}{\tau_0} \text{Cos}\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{2\Theta_{05}}\right) - \sqrt{2 \ln \frac{1}{P_F}}\right). \quad (8)$$

Як видно з даного виразу, при похибках з кутових координат $\varphi > \Theta_{05}$ об'єкт може бути пропущеним при виявленні. При цьому час виявлення може досягати достатньо великої величини. Розрахунки щодо зазначеної ймовірності наведені на рис. 3.

Тепер розглянемо функціонування підсистеми контролю та управління, тобто РТС, на другому етапі роботи при обслуговуванні польоту КА.

2. В процесі польоту КА після завершення етапу виведення необхідно постійно контролювати місцезнаходження КА у просторі. При цьому важною

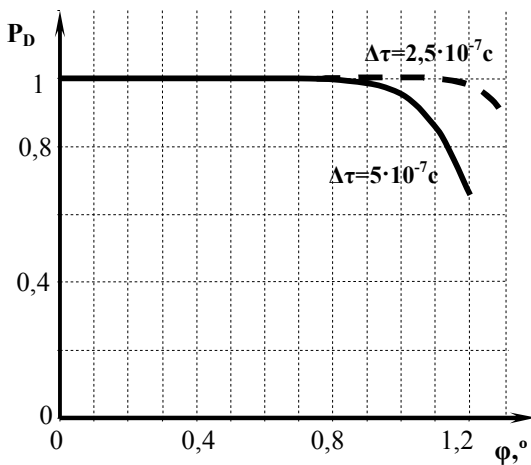


Рис. 3. Ймовірність виявлення від похибок ЦВ відділення КА від носія, можуть істотно порушитися початкові умови польоту. Тоді вирішення задач БЗ керування польотом КА на позаштатній орбіті безпосередньо після відділення при однопунктній технології поєднано з рядом труднощів. По-перше, неточно відоме місце розташування центра мас КА в просторі. По-друге виходячи з того, що запуск виконується з орендованих площадок (наприклад, Байконур (Російська Федерація), Алькантара (Бразилія), Куру (Франція), «Морський старт») найбільш важливий етап запуску може бути невидимим для вітчизняних засобів. Крім того, у даний період, запуски з нових полігонів виконуються по новим необладнаним трасам і вимагають постійної корекції. Необхідно також врахувати значні обмеження умов видимості об'єкту радіотехнічними засобами наземного вимірювального пункту. Тоді виконання задач БЗ на початковому етапі польоту КА може бути виконано з істотними похибками. Похибка, яка накопичується в початковий період польоту вздовж орбіти, в ряді випадків не дозволить з необхідною точністю розрахувати ЦВ антенним системам вимірювальних засобів для проведення операцій технологічного циклу управління, тобто командно-програмного забезпечення, прийому телеметричної і вимірювальної інформації з борту КА. Потрібно відзначити, що через похибки виведення, насамперед по періоду витка, відбувається швидкий «ухід» КА з діаграми спрямованості антени, орієнтація якої здійснюється відповідно до розрахункової (номінальної) траєкторії. Це, у свою чергу, приведе до неможливості провести

сеанс зв'язку з КА на найближчих витках і надалі до можливої втрати контролю над об'єктом. Для таких аварійних випадків може бути запропоновано програмний супровід КА, у якому задача ЦВ для антенних систем вирішується з використанням можливостей БЗ польоту КА.

З огляду на структурну схему радіосистеми (рис. 4) контролю та управління космічними апаратами (КА) знайдемо залежність дисперсії вихідного процесу від дисперсії цілевказівок в умовах, коли здійснюється програмний супровід об'єкта.

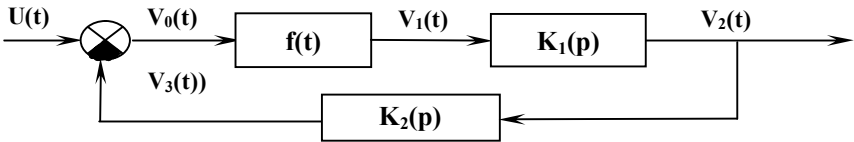


Рис. 4. Схема радіосистеми контролю та управління

Тут $f(t)$ – певна функція часу, яка в загальному випадку є нелінійною. Припустимо, що змінний коефіцієнт $f(t)$ визначається виразом

$$f(t) = b/(t_k - t); \quad t \leq t_k, \quad (9)$$

де $b > 0$, $t_k > 0$ – сталі параметри.

Виходячи з фізики процесу супроводу, зауважимо, що він здійснюється на основі даних БЗ, отже зв'язок дисперсії вихідного процесу від похибок БЗ є безсумнівним. При цьому умова (9) визначає як раз систему радіоуправління визначеного типу.

Нехай також $U(t)$ є стаціонарним випадковим процесом з кореляційною функцією

$$R_u(\tau) = \sigma_u^2 \exp\left\{-\frac{|\tau|}{T_1}\right\}. \quad (10)$$

Визначимо дисперсію $\sigma_v^2(t)$ процесу $V_2(t)$. В загальному випадку для визначення зазначеної дисперсії слід знати передавальну функцію замкненої системи слідкування

$$K(s, t) = b\Phi^{-1}(s) e^{as} \int_s^{\infty} e^{az} K_1(z) \Phi(z) dz, \quad (11)$$

де $\Phi(s) = s^{-\mu} \exp\left[\int_s^{\infty} \left(bK(z) - \frac{\mu}{z}\right) dz\right]$; $\mu = b \lim_{s \rightarrow \infty} sK(s)$; b – певний коефіцієнт.

Зазначимо при цьому, що аналітичні вирази для функції $K(s, t)$ одержуються в окремих часткових випадках.

Припустимо, що $bK_1(s) = s/(1 + sT)$; $K_2(s) = 1/s^2$. Такими виразами описується, наприклад, слідкуюча система далекомірного каналу РТС “Кама”, що використовується для визначення параметрів руху КА. В цьому випадку інтеграл (11) обчислюється в квадратурах та дає

$$K(s, t) = \frac{s}{(t_k - t)(1 + sT)}. \quad (12)$$

За даною передавальною функцією визначимо імпульсну характеристику:

$$g(t, \tau) = L^{-1}\{K(s, t)\} = \frac{1}{(t_k - t)\Gamma} \left[\delta(\tau) - \frac{1}{T} e^{-\tau/T} \right], \quad (13)$$

де $L^{-1}\{\cdot\}$ – зворотне перетворення Лапласу.

Оскільки $K_u(s) = L\{R_u(\tau)\} = \sigma_u^2 T_1 / (1 + sT_1)$, то вираз для зображення згортки

$$\Phi(s, t) = K(s, t) K_u(s) \quad (14)$$

буде мати вигляд

$$\Phi(s, t) = \frac{\sigma_u^2 T_1 s}{(t_k - t)(1 + sT)(1 + sT_1)}. \quad (15)$$

За таблицями перетворення Лапласу знаходимо оригінал:

$$\varphi(\tau, t) = \frac{\sigma_u^2}{(t_k - t)\Gamma(T - T_1)} \left(T e^{-\tau/T_1} - T_1 e^{-\tau/T} \right). \quad (16)$$

Підставимо (13) та (16) у вираз для визначення дисперсії, а саме:

$$\sigma_V^2(t) = 2 \int_0^{t-t_0} g(t, t - \tau) g(\tau, t) d\tau. \quad (17)$$

При цьому одержимо

$$\begin{aligned} \sigma_V^2(t) = & \frac{\sigma_u^2}{(t_k - t)^2 \Gamma(T - T_1)} \left[\frac{T - T_1}{T + T_1} - \frac{T_1}{T} \exp\left\{-\frac{2(t - t_0)}{T}\right\} \right] + \\ & + \frac{2T_1}{T + T_1} \exp\left\{-(t - t_0) \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_1} \right)\right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

В усталеному режимі при $t_0 \rightarrow \infty$ з урахуванням того, що

$$S_u(\omega) = 2\sigma_u^2 T_1 / (1 + \omega^2 T_1^2),$$

одержимо вираз

$$\sigma_V^2(t) = \frac{\sigma_u^2}{(t_k - t)^2 \Gamma(T + T_1)}. \quad (19)$$

Розрахунки згідно виразу (19) показують, що дисперсія процесу $V_2(t)$ зворотно пропорційна часу інтегрування в згладжувальних колах і зменшується до 10% від начального значення дисперсії ЦВ.

Висновки. Отримані співвідношення (вирази 8 та 19) визначають якість роботи РТС в залежності від похибок даних БЗ в умовах роботи останньої на етапах первинного пошуку і виявлення КА та подальшого його супроводу вздовж орбіти польоту.

Похибка БЗ починає суттєво впливати на ймовірність виявлення сигналу, коли вона перевищує приблизно 0,7 напівширини діаграми спрямованості РТС. Тому при виконанні РТС своїх функцій, необхідно знати не тільки самі дані цілевказівок, але й їх інтервал довіри, при якому ймовірність виявлення об'єкту у просторі не перевищує зазначеної величини.

Дисперсія похибки програмного супроводу КА пропорційна величині дисперсії похибок ЦВ і суттєво залежить від сталих часу вузлів замкненої системи слідкування за КА у просторі, тобто від інерційності антенної системи в цілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попов В.М., Лисаченко І.Г., Чумак Б.О., Роянов О.М. Оцінка достовірності траєкторного контролю руху космічних об'єктів // Збірник наукових праць. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – К.: НАНУ, ІПМЕ. – 2004. – Вип. 25. – С. 175 – 181.
2. Коростелев А.А., Клюев Ю.А., Мельников Н.Ф. Теоретические основы радиолокации / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с ШПС. – М.: РИС, 1985. – 384 с.
4. Тузов Г.И., Сивов В.А. и др. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. – М.: РИС, 1985. – 264 с.
5. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы. – Минск.: Вышэйшая школа, 1988. – 370 с.
6. Ван Трис Г. Теория обнаружения оценок и модуляции: Т. 1. – М.: Сов. радио, 1972. – 744 с.
7. Шишов В.А., Ворошилов Ю.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов. – М.: Р и С, 1987. – 144 с.
8. Потапов Е.П. Методы синхронизации и поиска широкополосных шумоподобных сигналов. – МО СССР, 1974. – 99 с.

Надійшла 5.04.2005

Рецензент: доктор технічних наук професор Л.Ф. Купченко,
Об'єднаний науково-дослідний інститут Збройних Сил, Харків