

УДК 623.462.22: 621.371.332.4

Б.О. Чумак, І.А. Нос, О.М. Мішуков

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

**АНАЛІЗ ПОХИБОК ТРЬОХПАРАМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Наведений математичний апарат щодо аналізу точності функціонування трьохпараметричних вимірювальних систем.

**Ключові слова:** радіотехнічні вимірювальні системи, точність.

**Постановка проблеми та аналіз літератури**

В умовах практичного використання різних радіотехнічних вимірювальних систем (РТС) істотну роль грає їх перешкодостійкість, яка у багатьох випадках зумовлює можливість виконання ними поставлених завдань. Перешкодами можуть бути будь-які дії, що знижують ефективність РТС, тобто дії, що зменшують дальність і точність вимірювань. Перешкоди можуть бути природними і створюватися штучно. До природних перешкод відносяться, в першу чергу, власні шуми приймальних пристроїв, а також віддзеркалення від місцевих предметів, земної і морської поверхні, галактичні шуми і інші чинники, які пов'язані з особливостями побудови РТС і умовами її роботи. Оцінка точності РТС при цьому є достатньо складним завданням. Так, наприклад, погрішності вимірювань в трьохпараметричних РТС як слід не проаналізовані [1 – 3]. Вирішення даної проблеми дозволить своєчасно оцінювати можливості таких систем для їх застосування за призначенням.

**Основний матеріал**

Трьохпараметричним РТС властиві наступні шумові погрішності вимірювань кутових координат:

- погрішності за рахунок теплових шумів приймальної апаратури;
- погрішності за рахунок амплітудних шумів цілі;
- погрішності за рахунок кутових шумів цілі;
- погрішності за рахунок багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Сюди також можна віднести погрішності за рахунок шумів самої слідкуючої системи.

Розглянемо детальніше ці складові.

Погрішність вимірювань за рахунок теплових шумів приймальної апаратури визначається наступним виразом:

$$\sigma_{Tш} = \frac{1,4\theta_{0,5}}{K_s \sqrt{F_{\text{прм}} \tau \left(\frac{S}{N}\right) \left(\frac{f_3}{F_{\text{сс}}}\right)}}, \quad (1)$$

де  $\theta_{0,5}$  - ширина діаграми спрямованості антени по рівню половинної потужності;

$K_s$  - крутизна характеристики пеленгації;

$F_{\text{прм}}$  - ширина смуги пропускання приймача;

$\tau$  - тривалість зондуючих імпульсів;

$\frac{S}{N}$  - відношення сигнал/шум на вході приймача;

$f_3$  - частота повторення зондуючих імпульсів;

$F_{\text{сс}}$  - ширина смуги пропускання слідкуючої системи.

З виразу (1) виходить, що дана погрішність істотно залежить від ширини діаграми спрямованості антени і крутизни характеристики пеленгації і у меншій мірі залежить від параметрів приймального пристрою і слідкуючої системи.

Погрішності за рахунок амплітудних шумів цілі викликаються флуктуаціями амплітуди у сигналі відповіді унаслідок складної конфігурації цілі, без урахування впливу змін її дальності. Ці флуктуації амплітуди сигналу викликають паразитну модуляцію, що впливає на точність визначення обох координат. Дану погрішність можна знайти із співвідношення:

$$\sigma_{\text{ампл}} = 0,67\theta_{0,5} \sqrt{A^2(f_3) F_{\text{сс}}}, \quad (2)$$

де  $A(f_3)$  - середньоквадратичне значення глибини шумової амплітудної модуляції сигналу, що приймається, на частотах, близьких до частоти сканування діаграми спрямованості, залежне від частоти проходження зондуючих імпульсів і характеристик цілі.

Погрішності за рахунок кутових шумів цілі викликають в часі здавану зміну положення цілі щодо опорної точки на ній (центральної точки цілі), тобто усереднене за великий період часу положення точки, по якій здійснюється слідкування за ціллю.

Ця погрішність рівна:

$$\sigma_{\text{к.ш}} = \frac{R_0}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

де  $R_0$  - еквівалентний радіус випадкових переміщень розподілених відбитих ділянок цілі по відношенню до дійсної кутової координати.

Дані переміщення складають величину порядку  $0,15L \div 0,3L$ , де  $L$  - габаритний розмір цілі по вимірюваній координаті.

Погрішності за рахунок багатопроменевого розповсюдження радіохвиль викликані кінцевим рівнем бічних пелюсток діаграми спрямованості антени. Дані погрішності визначаються співвідношенням:

$$\sigma_{м,р} = \frac{\rho \cdot \theta_{0,5}}{\sqrt{8A_s}}, \quad (4)$$

де  $A_s$  - відношення сумарних пікових рівнів діаграми спрямованості слідкуючої антени і бічних пелюсток, що створюють помилку;

$\rho$  - коефіцієнт віддзеркалення поверхні цілі.

На підставі виразів  $2 \div 4$  можна укласти, що для зменшення вищезгаданих погрішностей необхідно звужувати смугу пропускання слідкуючої системи, а також мати вузькоспрямовану антену РТС.

Погрішності вимірювання похилої дальності.

Всі ці погрішності можна розділити на складові:

- погрішності, залежні від структури РТС;
- погрішності, залежні від відбиваючих властивостей цілі, рівняння її руху і апаратури ретрансляції;
- погрішності, залежні від флуктуацій атмосфери;
- швидкозмінні погрішності, час кореляції яких менше сталої часу фільтру ( $T_\phi$ ) слідкуючої системи вимірювання дальності і які усереднюються в цифровому фільтрі;

- повільно змінні погрішності, час кореляції яких значно більше  $T_\phi$  і, отже, системою не враховуються.

Розглянемо деякі складові цих погрішностей.

Погрішності, обумовлені структурою часового дискримінатора визначаються виразом:

$$\sigma_D = \sqrt{(\sigma'_D)^2 + \frac{\Delta q^2}{3}}, \quad (5)$$

де  $\Delta q$  - максимальний відхід нуля дискримінатора;

$\sigma'_D$  - знаходиться із співвідношення:

$$\sigma'_D = \frac{\sigma_{ш}}{S_D}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{ш}$  - шумова складова на вході приймача і власні шуми приймача;

$S_D$  - крутизна лінійної ділянки характеристики дискримінатора.

Погрішності перетворення напруги в код визначаються співвідношенням:

$$\sigma_{пнк} = \frac{u_{вх.макс}}{2^n - 1}, \quad (7)$$

де  $u_{вх.макс}$  - максимально можлива напруга з виходу часового дискримінатора;

$n$  - число рівнів квантування сигналу в перетворювачі.

Погрішності перетворення код - часовий інтервал можуть бути знайдені з виразу:

$$\sigma_{пк-чі} = \sqrt{(\sigma')^2 + \frac{\Delta_{пк-чі}^2}{3}}, \quad (8)$$

де  $\Delta_{пк-чі}^2$  - систематична погрішність перетворювача код - часовий інтервал (ПКЧІ), що виникає унаслідок нестабільності параметрів мікросхем;

$\sigma'$  знаходиться з виразу

$$\sigma' = \frac{q_{пк-чі}}{\sqrt{12}}, \quad (9)$$

$q_{пк-чі}$  - крок квантування в ПКЧІ;

число під коренем в знаменнику визначається вибраною дискретністю перетворення.

Погрішності формування слідкуючих стробів в основному визначаються наступними чинниками:

- часом перехідних процесів в мікросхемах;
- кліматичними умовами ( $\Delta t, ^\circ C$ );
- дискретністю настановної лінії затримки

і можуть бути визначені виразом:

$$\sigma_{фор стр} = \sqrt{\frac{\sigma_{лз}^2}{3} + \frac{\Delta \tau_{ср}^2}{3}}$$

де  $\sigma_{лз}$  - погрішності в лінії затримки;

$\Delta \tau_{ср}$  - час спрацьовування мікросхем.

Погрішності, обумовлені шумом приймача і шумами на вході антени, які впливають на часовий дискримінатор, визначаються наступним виразом:

$$\sigma_D = \frac{C\sqrt{\pi}}{16} \frac{1}{K_{п\mu}} \sqrt{(B_1 + B_2 - 1) + 2 \frac{\tau_{стр}}{\tau_{від}} \cdot \sqrt{\frac{\tau_{від}}{F_{прм}}}}, \quad (10)$$

де  $C$  - швидкість світла;

$K_{п\mu}$  - коефіцієнт, що відображає придушення сигналу шумом в амплітудному детекторі;

$\mu$  - відношення сигнал/шум;

$\tau_{стр}$  - тривалість слідкуючого стробу;

$\tau_{від}$  - тривалість відеоімпульсу на вході дискримінатора;

$F_{прм}$  - смуга пропускання приймача.

Величини  $B_1$  і  $B_2$  знаходяться з виразів:

$$B_1 = 4 \left\{ \frac{\mu}{\sqrt{2}} \cdot \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) \left[ J_0\left(\frac{\mu^2}{2}\right) + J_1\left(\frac{\mu^2}{2}\right) \right] \right\}; \quad (11)$$

$$B_2 = \exp\left(-\frac{\mu^2}{2}\right) \left[ J_0^2\left(\frac{\mu^2}{2}\right) + J_1^2\left(\frac{\mu^2}{2}\right) \right], \quad (12)$$

$J_0, J_1$  - модифіковані функції Бесселя першого роду нульового та першого порядку відповідно.

Погрішності за рахунок нестабільності опорного генератора пристрою синхронізації можуть бути визначені співвідношенням:

$$\sigma_{НОГ} = \frac{R_{макс}}{3} \frac{\Delta f}{f_0} \quad (13)$$

де  $R_{макс}$  - максимальна дальність дії РТС;

$f_0/\Delta f$  - відносна нестабільність частоти опорного генератора.

Погрішності із-за перетворення синусоїдальної напруги в імпульсну визначаються виразом:

$$\sigma_{\text{ПСН}} = \sqrt{(\sigma'_3)^2 + (\sigma'_n)^2}, \quad (14)$$

де  $\sigma'_3$  - зміна затримки протягом періоду імпульсного сигналу;

$\sigma'_n$  - зміна величини порогу перетворювача.

Погрішності за рахунок зміни затримки в приймальному пристрої знаходяться із співвідношення:

$$\sigma_{33} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_{3i})^2}}{3}, \quad (15)$$

де  $\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_{3i})^2$  - сумарна затримка сигналу в приймачі.

Погрішності за рахунок нестабільності схеми запуску передавача можуть бути знайдені з виразу:

$$\sigma_{\text{НСЗ}} = \frac{\Delta t_{3\Sigma}}{3}, \quad (16)$$

де  $\Delta t_{3\Sigma} = \frac{\Delta t_{3i}}{i}$  - затримка в мікросхемах.

Погрішності за рахунок прив'язки до системи єдиного часу (СЄЧ) знаходяться із співвідношення:

$$\sigma_{\text{СЄЧ}} = \frac{V}{F_k},$$

де  $V$  - здавана швидкість супроводу цілі;

$F_k$  - частота формування коду часу з ціною молодшого розряду 10 мкс. Погрішності за рахунок багатопроменевого розповсюдження радіохвиль в атмосфері визначається по формулі:

$$\sigma_{\text{БРР}} = \frac{\rho \cdot h \cdot \sin \beta}{2\sqrt{\sigma_{\text{SR}}}}, \quad (17)$$

де  $\beta$  - кут місця цілі;

$\rho$  - коефіцієнт віддзеркалення відбивальної поверхні;

$h$  - висота антени щодо відбивальної поверхні.

Погрішності за рахунок зміни затримки у відповідачах:  $\sigma_{\text{max}} = 15\text{м}$  для більшості відповідачів.

Кожен конкретний зразок має паспортне значення затримки, яке повідомляється на РТС (або вимірюється при його калібруванні) для компенсації помилок вимірювань.

Погрішності при калібруванні по дальності визначаються кроком квантування і можуть бути знайдені по формулі:

$$\sigma_{\text{кал}} = \frac{\sigma_{\text{max кал}}}{\sqrt{3}}, \quad (18)$$

де  $\sigma_{\text{max кал}}$  - максимальна калібрувальна помилка.

Погрішності за рахунок рефракції в тропосфері.

Величина викривлення променю, а отже і запізнення сигналу визначається індексом рефракції (заломлення).

Приведений показник заломлення визначається по формулі:

$$N = (n - 1) \cdot 10^{-6} \approx \frac{77,6}{T} \left( P + \frac{4310}{T} \rho_n \right), \quad (19)$$

де  $n$  - показник заломлення тропосфери;

$T$  - абсолютна температура повітря;

$P$  - повний атмосферний тиск;

$\rho_n$  - парціальний тиск водяної пари.

Погрішності за рахунок рефракції в іоносфері.

Ці погрішності враховуються при відстанях до цілі понад 100 км.

Індекс рефракції в іоносфері як функція частоти визначається по формулі:

$$N_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{f_{\text{кр}}}{f} \right)^2, \quad (20)$$

де  $f_{\text{кр}}$  - критична частота для денного і нічного часу доби.

Відзначимо, що коректування двох останніх вказаних погрішностей проводиться на обчислювальному центрі.

Динамічні і флуктуаційні погрішності далекоміра: ці погрішності визначаються ефективною шумовою смугою слідкуючої системи далекомірного каналу. Операторний коефіцієнт передачі розімкненого кільця слідкування можна представити у вигляді:

$$H(p) = \frac{K_v}{p(1 + Tp)}. \quad (21)$$

При цьому передавальна функція замкнутої системи визначається виразом:

$$G(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)} = \frac{K_v}{Tp^2 + p + K_v}, \quad (22)$$

де  $K_v$  - коефіцієнт посилення розімкненого кільця стеження;

$T$  - стала часу фільтру.

Ефективна шумова смуга в цьому випадку має вигляд:

$$\Delta f_{\text{ш}} = K_v / 2. \quad (23)$$

Враховуючи, що замкнуте кільце слідкування забезпечує величину  $K_v$  порядку 10-20, отримуємо  $\Delta f_{\text{ш}} = 5 \div 10$  Гц.

Виходячи з технічних показників існуючих систем з імпульсним сигналом розглянемо числовий приклад. У оптимальному випадку:

$$\sigma_{\text{R фл}}^2 = \sigma_{\text{R дин}}^2 = \sigma_{\text{R апп}}^2 = \frac{\sigma_{\text{R\Sigma}}^2}{3}, \quad (24)$$

де  $\sigma_{\text{R фл}}^2$ ;  $\sigma_{\text{R дин}}^2$ ;  $\sigma_{\text{R апп}}^2$ ;  $\sigma_{\text{R\Sigma}}^2$  - відповідно дисперсії флуктуаційної, динамічної, апаратурної і сумарної помилок вимірювання дальності.

У запитному режимі:  $\frac{\sigma_{\text{R\Sigma}}^2}{3} = 5,3 \text{ м}^2$ .

Визначимо відношення сигнал/шум на вході приймача із співвідношення:

$$\sigma_R^2 = \frac{c^2}{32\mu_R \pi^2 (2F_{ск})^2}, \quad (25)$$

де  $c$  - швидкість розповсюдження радіохвиль;  
 $\mu_R$  - відношення сигнал/шум;  
 $F_{ск}$  - середньоквадратична ширина спектру сигналу.

Якщо, наприклад,  $\tau_i = 10^{-6}$  с, то:

$$2F_{ск} \approx \frac{0,2}{\tau_i} = \frac{0,2}{0,75 \cdot 10^{-6}} \approx 2,7 \cdot 10^4 \text{ Гц}$$

де  $\tau_i$  - тривалість імпульсу, отримаємо:

$$\mu_R = \frac{c^2}{32\sigma_R^2 \pi^2 (2F_{ск})^2} = \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{32 \cdot 5,3 \cdot 10 \cdot (2,7 \cdot 10^4)^2} \approx 7,4 \cdot 10^4.$$

Відзначимо, що  $\mu_R$  визначається виразом:

$$\mu_R = \frac{P_{с\text{ імп}} \tau_i}{2N_0 T_{п} \Delta f_{ш}}, \quad (26)$$

де  $P_{с\text{ імп}}$  - потужність сигналу на вході приймача;  
 $N_0$  - спектральна щільність потужності шумів на вході приймача;

$T_{п}$  - період проходження імпульсів.

Потужність корисного сигналу визначаємо, виходячи з основного рівняння радіолокації:

$$P_{с\text{ імп}} = \frac{P_{с\text{ прд}} G_6 G_3 \lambda_0^2}{(4\pi R)^2 V}, \quad (27)$$

де  $P_{с\text{ прд}}$  - потужність передавача;

$G_6$  - коефіцієнт посилення бортової антени;

$G_3$  - коефіцієнт посилення наземної антени;

$\lambda_0$  - довжина хвилі випромінюваного сигналу;

$V$  - коефіцієнт втрат радіолінії;

$R$  - відстань між приймачем і передавачем.

При значеннях  $G_6 = 1,5$ ;  $G_3 = 5 \cdot 10^4$ ;  $\lambda_0 = 0,1$  м

$V = 2$   $R = 10^6$  м отримаємо  $P_{с\text{ імп}} = 1,2 \cdot 10^{-11}$ .

При шумовій температурі середовища  $T = 1000^\circ$  спектральна щільність потужності шумів рівна:

$$N_0 \approx kT^\circ \approx 1,4 \cdot 10^{-20}, \quad (28)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/Гц · град - стала Больцмана.

Враховуючи, що  $T_{п} = \frac{1}{F_{п}} = \frac{1}{625}$  з (26) визначимо необхідне значення  $\Delta f_{ш}$  для даного прикладу:

$$\Delta f_{ш} = \frac{P_{с\text{ імп}} \cdot \tau_i}{N_0 \cdot 2 \cdot T_{п} \cdot \mu_R} = \frac{1,2 \cdot 10^{-11} \cdot 0,75 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 10^{-20} \cdot \frac{1}{625} \cdot 2 \cdot 7,4 \cdot 10^4} \approx 4 \text{ Гц.}$$

Для того, щоб забезпечити таку ж величину дисперсії динамічної помилки вимірювання дальності, тобто  $\sigma_{R\text{ дин}}^2 = 5,3 \text{ м}^2$ , необхідно забезпечувати програмний супровід по дальності з помилкою по прискоренню не більш:

$$\Delta \ddot{R} = \sigma_{R\text{ дин}} \cdot 4 \cdot \Delta f_{ш}^2 = 2,3 \cdot 4 \cdot 16 = 14,1 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

## Висновок

Таким чином в статті запропонований математичний апарат, який дозволяє на основі аналізу шумових (флуктуаційних) та динамічних характеристик вимірювальних каналів (каналу дальності та кутових координат) оцінити вклад основних похибок РТС в її загальну похибку. На цій основі можна робити висновок про доцільність застосування таких систем для процесу визначення траєкторій літальних об'єктів.

## Список літератури

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 426 с.
2. Дудник П.И. Многофункциональные радиолокационные системы / П.И. Дудник, А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский – М.: Дрофа, 2007. – 283 с.
3. Бакулев П.А. Радиолокационные системы / П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

Надійшла до редколегії 17.09.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Б.А. Чумак, И.А. Нос, А.М. Мишуков

Приведен математический аппарат для анализа точности функционирования трехпараметрических измерительных систем.

**Ключевые слова:** радиотехнические измерительные системы, точность.

## ANALYSIS OF ERRORS OF THE THREE-SELF-REACTANCE MEASUREMENTS SYSTEMS

B.O. Chumak, I.A. Nos, O.M. Michucov

A mathematical vehicle is resulted for the analysis of exactness of functioning of the three-self-reactance measurements systems.

**Keywords:** radio measuring system, accuracy.