Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи

УДК 681.396

DOI: 10.30748/soi.2020.161.13

Г.В. Альошин¹, О.В. Коломійцев², Г.В. Акулінін³, С.І. Клівець³

¹ Українська державна академія залізничного транспорту, Харків

² Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

³ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПАРАМЕТРИЧНИЙ ТА СТРУКТУРНИЙ ОПТИМАЛЬНИЙ СИНТЕЗ БАГАТОШКАЛЬНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

В статті розглянуті існуючі методи вимірювання радіоелектронних вимірювачів (вимірювальних і інформаційного каналів радіотехнічних систем (РТС)): дискримінаційні (функціональні), панорамні (пошукові), багатоканальні, багатошкільні, багаторішні та комбіновані. Дискримінаційний (функціональний) метод вимірювання найпростіший в реалізації, але, згідно кривої обміну, його точність суперечить великому діапазону вимірювань. Тому, з'являються інші ефективніші методи. З аналізу отриманих кривих обміну дискримінаційних вимірювачів можна стверджувати, що найменша дисперсія погрешності може бути при малому априорному діапазоні вимірювань і при малій смузі пропускання. Тобто, при фазових методах вимірювань, при гармонійних сигналах шкали, які перекривають увесь діапазон. А найбільша точність вимірювань – досягається на найбільшій частоті за рахунок крутизни сигналу фазових детекторів. Отже, фазові багатошкільні вимірювачі мають істотну перевагу в економії енергії сигналу. Відмічено, що кожний вимірювач (канал системи) реалізує свій метод вимірювання, відповідає своєму принципу дії та будується на множині параметрів, сигналів і структур. Показана можливість постановки і рішення задач оптимізації багатошкільних радіотехнічних інформаційно-вимірювальних систем (РТІВС) за критерієм максимуму точності вимірювань різних типів систем (каналів) при обмеженнях на параметри і вартість, а також синтез їх вимірювальної структури і сигналів на трьох множинах (параметрів, сигналів і структур). Акцентовано увагу на те, що введення показника вартості дозволяє, передусім, класифікувати, згідно з кривими обміну, усі багатошкільні РТІВС на допустимі, раціональні і оптимальні, що спрощує їх проектування та вперше є основою для оцінки їх реалізації. Представлені методи щодо отримання кривих обміну якостей радіоелектронних вимірювачів. Отримані аналітичні вирази для вибору методу вимірювання, структури і параметрів радіоелектронних вимірювачів (каналів) для РТІВС з панорамним, багатоканальним, багаторішним і багатошкільним методами вимірювання з одночасними шкалами, або з послідовними в часі шкалами.

Ключові слова: радіоелектронний вимірювач, вимірювальний канал, радіотехнічна система, багатошкільність, неоднозначність вимірювань, методи вимірювання, ефективність, вартість, криві обміну.

Вступ

Постановка проблеми. Відомі методи вимірювання радіоелектронних вимірювачів (вимірювальних і інформаційних каналів) багатошкільних радіотехнічних інформаційно-вимірювальних систем (РТІВС) будуються на множині параметрів, сигналів і структур.

Однак, існує проблема, яка викликана тим, що при великому априорному діапазоні та при однозначних фазових вимірюваннях неможливо досягнути

високої точності.

Це пов'язано з потребою мати достатньо велику частоту шкал сигналу, яка забезпечує відповідно найбільшу крутизну шкал фазового детектору і точність. Але при застосуванні великої частоти потребується додаткове розкриття неоднозначності вимірювань.

Таким чином, розробка оптимального методу вимірювання, який дозволить отримати оптимальні структуру вимірювача, сигнал, що використовується та відповідні параметри за умовним критерієм мак-

симуму ефективності при обмеженій вартості – є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує класифікація методів вимірювання радіоелектронних вимірювачів [1–5]: дискримінаційні (функціональні), панорамні (пошукові), багатоканальні, багатошкальні, багатоетапні та комбіновані. Кожний вимірювач реалізує свій метод вимірювання, який відповідає своєму принципу дії та будується на множині параметрів, сигналів і структур.

Панорамний метод кращий за простотою реалізації, але поганий за максимальним часом вимірювання та за можливим пропуском об'єкту, багатоканальний – кращий за мінімальним часом вимірювання, але складний за кількістю і великою вартістю каналів та ще є й багатозначність при великому сигналі, багатоетапний – кращий за те, що вміщує як точні етапи, так і ті, що вирішують багатозначність вимірювань.

Введення (врахування) показника вартості дозволить, передусім, класифікувати, згідно з кривими обміну якості, усі РТІВС на допустимі, раціональні і оптимальні, що надасть змогу спростити їх проектування (отримати оптимальні структуру та параметри сигналу).

Формулювання мети статті. Метою статті є постановка і рішення задач оптимізації багатошкальних РТІВС за критерієм максимуму точності вимірювань різних типів систем (каналів) при обмеженнях на параметри і вартість, а також синтез їх вимірювальної структури і сигналів на трьох множинах (параметрів, сигналів і структур).

Виклад основного матеріалу

Параметричний та структурний оптимальний синтез багатошкальних РТІВС тісно пов'язаний з проблемою підвищення точності вимірювань, яка при великих апіорних діапазонах і частоті шкал фазового детектора вирішується багатошкальним вимірювачем (рис. 1).

Рис. 1. Вихідна характеристика фазового детектора

Багатошкальні вимірювачі можуть бути з послідовними шкалами у часі та паралельними і одночасними. Структура таких вимірювачів схожа на структуру багатоетапних вимірювачів.

Послідовні, як і багатоетапні, вимірювачі можуть мати апаратну реалізацію як усіх шкал, так і однієї шкали із змінним періодом у часі.

Перевага багатошкальних вимірювачів перед багатоетапними вимірювачами полягає у тому, що немає необхідності у очікуванні настройки кожної послідовної шкали на значення оцінки попередньої. Тому шкали спочатку підстроєні та перекривають весь діапазон. Тобто час всього вимірювання можна зменшити до часу одного етапу (шкали).

Багатошкальні вимірювачі часто використовують при фазових вимірюваннях затримки, $\Delta\varphi = \omega_i \tau$ або відстані, а також при вимірюванні кутових координат при базовому методі пеленгації та ін.

При точних базових вимірюваннях пеленгу фазовим методом, або кутів приходу сигналу (Θ_x , Θ_y), співвідношення для оцінки кута Θ_x має вигляд:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_i} x = \frac{2\pi}{\lambda_i} B \sin \Theta_x, \quad (1)$$

де λ_i – довжина хвилі i -ї шкали; x – різниця ходу хвилі у крайніх точках бази B .

Якщо вимірювальна система стежить за затримкою, яка змінюється, то як і в багатоетапному вимірювачі, з фазового детектора отримується напруга для підстройки синхронізатора, а режим стеження прискорюється з частотою.

Якщо вимірювальна система вимірює багатошкальним фазовим методом відстань до рухомого об'єкту на ньому або на землі, то із-за багатозначності фазового детектора від різниці фаз стаціонарного сигналу і на рухомому об'єкті алгоритм ускладнюється і діє, наприклад, наступним чином:

1) вибирається діапазон однозначності вимірювань відстані, тобто найбільш груба шкала при сигналі з відповідною низькою частотою w_0 , щоб:

$$w_0 \frac{R}{c} \leq 2\pi,$$

де R – дальність від системи до об'єкту; c – швидкість розповсюдження світла.

Наприклад, при максимальній дальності $R=600$ км, $w_0 = \pi 10^3$ Гц. На першій шкалі визначається грубе значення дальності за формулою:

$$\varphi_1 = w_1 \frac{r_1}{c} = \arcsin \frac{U_\phi}{U_m}, \quad (2)$$

де U_ϕ – напруга фазового детектора, що відповідає фазі φ_1 ; U_m – максимальна напруга фазового детектора;

2) використовується груба шкала, за допомогою якої вирішується питання неоднозначності вимірювань. Щоб скористатись головною перевагою фазових вимірювань – вузькою смугою пропускання та, відповідно, малою завадою при тому же рівні

сигналу і з потрібною великою точністю σ_n^{-2} , необхідно значно підвищити частоту самої точної шкали w_n , згідно формули (2);

3) для уточнення оцінки першої, грубої шкали підвищуються частоти всіх шкал у геометричній прогресії. Для другої шкали це: $w_2 = w_1^2$, $w_3 = w_1^3$ і т.д.;

4) для другої шкали, оскільки невідома відстань до об'єкту, затримка сигналу може попасти або в інтервал АВ, коли $U_{\phi}^1(\varphi_1) \geq 0$ або в – ВС, коли навпаки (рис. 1). Тоді для другого випадку можливо записати, як:

$$\varphi_{2(2)} = 2\pi - \varphi_2.$$

Щоб визначити цей інтервал треба, по-перше, для спрощення системи здвигнути шкалу сигналу на $\pi/2$ та на фазовий детектор з синхронізатора подати сигнал нездвигнутий на $\pi/2$, а, по-друге, визначити знак першої похідної;

5) на другій, більш точній шкалі період w_1 менший в те ж число разів. Тому визначається ціле число k цих періодів із значення затримки сигналу першої, грубої шкали, а залишок $\Delta\varphi_2$ можливо визначити, більш точно, фазовим детектором за формулою, що аналогічна (2):

$$\varphi_2 = k_2 2\pi + \Delta\varphi_2.$$

Таким чином, з урахуванням всіх шкал, можливо отримати формулу для визначення дальності до об'єкту:

$$R = \sum_{i=1}^n k_i r_i + \Delta r_n,$$

де Δr_n – похибка вимірювання дальності;

6) якщо перша частота дорівнює 10 Гц, то це означає – значення відстані у десятичній системі обчислення із заданою точністю.

Для вимірювання фази (затримки сигналу) часто використовують цифровий часово-імпульсний метод.

Таким чином, багатошкарльні вимірювачі дозволяють отримувати задану точність при заданому енергетичному потенціалі у широкому діапазоні параметра практично за час роботи однієї шкали.

Однак, їх суттєвим недоліком, окрім складності, є нелінійність шкал, яка має великий вплив на другу (точну) шкалу. Цей недолік можливо зменшити, паралельним на кожній шкалі, фазовим детектором із здвигнутою затримкою сигналу на чверть періоду і з відповідною логікою.

Як і для багатоетапних вимірювачів можливі два варіанти побудови багатошкарльних вимірювачів: з однією змінною шкалою, або з всіма шкалами. У першому випадку сигнал, наприклад, подібний до мелодії, а по другому – подібний до акорду.

Ефективність багатошкарльного методу вимірювання

Якщо схема вводу в синхронізм така ж, як у фазовому автоматичному підстроюванні частоти (ФАПЧ), то точність багатошкарльної системи, що стежить, буде такою ж, як у багатоетапної системи, тобто:

$$\sigma_n^{-2} = \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2}, \quad (3)$$

де σ_i – середньоквадратична похибка i -ї шкали;

для гармонічного сигналу, коли:

$$U_i(t) = U_{ui} \sin \omega_i \tau,$$

де ω_i – колова частота i -ї шкали, τ – затримка сигналу.

Дисперсія похибки кожної шкали з частотою ω_i :

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{\sigma_{ui}^2}{(U_i^1)^2} = \frac{\sigma_{ui}^2}{(\omega_i U_{ui})^2} = \frac{1}{\omega_i^2 q_i}, \quad (4)$$

де q – потужність сигналу до шуму.

Тоді задачу оптимального синтезу багатошкарльних вимірювальних систем можливо записати у наступному вигляді:

$$\max \sigma_p^{-2} = \max \left[\sigma_a^{-2} + \sum_{i=0}^{\infty} \omega_i^2 q_i \right],$$

де σ_a^{-2} – априорна дисперсія загальної похибки,

$$\text{при} \quad \left\{ \begin{array}{l} \omega_1^2 \leq \frac{b_1}{\sigma_a^2}, \\ \omega_2^2 \leq b_2 \left[\frac{1}{\sigma_a^2} + q_1 \omega_1^2 \right], \\ \dots \\ \omega_n^2 \leq b_n \left[\frac{1}{\sigma_a^2} + \sum_{i=1}^{n-1} q_i \omega_{i-1}^2 \right], \\ \sum_{k=0}^n q_k \leq q, \end{array} \right. \quad (5)$$

де b_i – коефіцієнт однозначності кожної шкали.

Тоді:

$$\sigma_p^{-2} = \sigma_a^{-2} \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{b_k}{a_k} q_k \right), \quad (6)$$

де a_k – коефіцієнти запасу за частотою, яка визначається з умов досягнення рівності своїх значень на межі обмежень:

$$a_k \omega_k^2 = b_k \left[\frac{1}{\sigma_a^2} + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{\omega_{i-1}^2}{a_{i-1}^2} q_{i-1} \right]. \quad (7)$$

Задачу (5) можливо записати у вигляді:

$$\max_{\{E_k\}} A = \max_{\{q_k\}} \frac{\sigma_p^{-2}}{\sigma_a^{-2}} = \max_{\{E_k\}} \prod_{k=1}^n (1 + \xi_k q_{k-1}), \quad (8)$$

при
$$\sum_{k=1}^n q_k \leq q,$$

де A – показник ефективності вимірювача, $\xi_k = \frac{b_k}{a_k}$.

Рішення для (8) нескладно отримати, наприклад, за методом виродженого динамічного програмування [2], тоді:

$$\max_{\{\eta_i\}} \frac{\sigma_p^{-2}}{\sigma_a^{-2}} = \max_{\{\eta_i\}} \left(\frac{q + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\xi_i}}{n} \right)^n \prod_{i=1}^n \xi_i, \quad (9)$$

при

$$q_{k \text{ opt}} = \frac{q}{n} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\xi_i} - \frac{1}{\xi_k}. \quad (10)$$

У випадку $\xi_k = \xi$ рішення спрощується, коли:

$$\frac{b_i}{a_i} = \frac{b_{i-1}}{a_{i-1}} \quad \text{для } \forall i \in [1, n], \quad \text{оптимальне ціле число}$$

шкал n можливо визначити з рівняння:

$$n = \frac{\ln A}{\ln \eta q - \ln n}, \quad (11)$$

або із ітераційної формули:

$$n_i = \frac{\ln \eta q - \ln n_{i-1} + 1}{\frac{(\ln \eta q - \ln n_{i-1})^2}{\ln A} + \frac{1}{n_{i-1}}}. \quad (12)$$

Узагальнена крива обміну багатошкального методу формально співпадає з кривою обміну багаторічного методу тому, що і в цьому випадку результат вимірювання – похибка грубої шкали є апріорним інтервалом для послідовної наступної шкали.

Оптимальний синтез багатошкальних РТІВС

Якщо, наприклад, необхідно врахувати показник вартості вимірювача, який є загальним обмеженням на параметри системи, то з'являється можливість оптимального синтезу системи за всіма показниками якості і параметрів.

За умови, що система сумісна, тобто, $C_i(q)$ та q загальні для всіх шкал, при рівних вартостях вимірювачів в кожній шкалі $C_{1k} = C_1$ та коефіцієнтів $b_k = b$, то задачу оптимізації багатошкального фазового вимірювача затримки можливо представити у наступному вигляді:

$$\min_{\{q, n\}} C = \min [C_i(q) + n C_1], \quad (13)$$

при обмеженні:

$$(1 + bq)^n \geq A, \quad (14)$$

де ефективність:

$$A = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_{n \text{ on}}^2},$$

$\sigma_{n \text{ on}}^2$ – допустиме значення дисперсії похибки вимірювання затримки, C – сумарна вартість вимірювача в цілому, що має той же сенс, що і $C_i(q)$.

Рішення задачі (13–14) можливо отримати з рівняння:

$$\frac{dC_i(q)}{dq} = C_1 \frac{\ln A}{(1 + \xi q) \ln^2 (1 + \xi q)}, \quad (15)$$

або з рівняння:

$$X = \exp \left[K_1 \left(X C'_{i(X)} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \quad (16)$$

де: $X = 1 + \xi q$, $C_i(q) = C_i \left(\frac{X-1}{\xi} \right)$, $K_1 = \sqrt{\frac{C_1 \ln A}{\xi}}$.

Рішення q_{opt} рівняння (15) можливо чисельно визначити з ітераційної формули, що отримана за методом Ньютона-Рафсона:

$$X_i = \frac{\exp \left\{ \left[K_1 \left(X_{i-1} C'_{i(X_{i-1})} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \left[1 + X_{i-1} K_2 \left(X_{i-1} \right) \right] \right\}}{1 + K_2 \left(X_{i-1} \right) \exp \left[K_1 \left(X_{i-1} C'_{i(X_{i-1})} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}, \quad (17)$$

де

$$K_2(X_{i-1}) = \frac{K_1}{2} \left(X_{i-1} C'_{X_{i-1}} \right)^{-\frac{3}{2}} \left(C'_{X_{i-1}} + X_{i-1} C''_{X_{i-1}} \right).$$

У загальному випадку, коли вимірювач є не сумісна система, а система з роздільним прийомом сигналів різних шкал, наприклад, багатобазова система, то задачу оптимізації можливо формалізувати у вигляді:

$$\min_{\left\{ \begin{smallmatrix} q_k \\ n \end{smallmatrix} \right\}} C = \min \left\{ \sum_{k=1}^n [C_i(q_k) + C_{1k}] \right\}, \quad (18)$$

при обмеженні

$$\prod_{k=1}^n (1 + \xi q_k) = A. \quad (19)$$

Аналогічним чином можливо показати, що оптимум досягається при: $\xi_k = \xi$; $q_{k \text{ opt}} = q_{k-1} = q$. Тому задача (18–19) зводиться до наступної:

$$\min_{\left\{ \begin{smallmatrix} q_k \\ n \end{smallmatrix} \right\}} C = \min n [C_i(q_k) + C_{1k}], \quad (20)$$

при

$$(1 + \xi q_k)^n = A. \quad (21)$$

Рішення можливо отримати з функціонального рівняння:

$$\frac{1}{X \ln X} = \frac{C'_2(X)}{C_2(X) + C_1}. \quad (22)$$

Задачі загальної оптимізації параметрів багатошкільних вимірювальних систем, сигналів та їх структур будуть надані далі.

Функції обміну для оптимального синтезу багатошкільної РТІВС і її функціональних елементів

Функції обміну доречні тим, що завжди можливо знайти їх рішення відносно тих показників, які вважаються найбільш потрібні. Це дозволяє за таким показником, у загальному вигляді та при однобічних каналах системи, порівнювати методи вимірювання.

Наприклад, для панорамного методу вимірювання максимальний час пошуку (вимірювання) у приймальному каналі системи, дорівнює:

$$t_n = \frac{\beta_a D_a^{1/2}}{2\Delta\lambda_\phi} \frac{q_{n\text{пр}}(P_{\text{ном}})N_0}{P_n}, \quad t_n = n_1 \tau_1,$$

де $n_1 = \frac{\beta_a D_a^{1/2}}{\Delta\lambda_\phi} = A$ – число розрізнених елементів;

$\tau_1 = 3\tau$ – дорівнює трьом сталим часу системи.

Таким чином, відбір методу вимірювання стане можливим за часом оцінювання параметра сигналу для системи з панорамним, багатоканальним, багатоетапним та багатошкільним методами із одночасними шкалами $t_{3(1)}$, або з послідовними у часі шкалами $t_{3(2)}$, можливо записати, відповідно, у вигляді:

$$t_1 = n_k \frac{q_1 N_{01}}{G_1 \prod_i X_{i1}}; \quad (23)$$

$$t_2 = \frac{q_2 N_{02}}{G_2 \prod_i X_{i2}} \quad n_2 = A; \quad (24)$$

$$t_{3(1)} = \frac{q_3 N_{03(1)}}{G_{3(1)} \prod_i X_{i3}}; \quad n_{3(1)} = A; \quad (25)$$

$$t_{3(2)} = n_E \frac{q_3 N_{03(2)}}{G_{3(2)} \prod_i X_{i3}}; \quad n_{3(2)} = \frac{\ln A}{\ln \eta q_3}, \quad (26)$$

де q_e – необхідне відношення сигнал/шум на виході системи вимірювальної структури; G_1 – коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени; N_{01} – спектральна щільність вихідних шумів; $X_{il}(Y_{il})$ – “фазові” параметри системи, як функції від технічних параметрів та параметрів корекції сигналів, що впливають на рівень сигналу в системі з L -ю структурою; n_1 , $n_2 = A$, n_E , n_p – число елементів розрізнення, каналів, етапів або шкал.

Висновки

1. Панорамний метод кращий за простотою реалізації, але поганий за максимальним часом вимірювання та за можливим пропуском об'єкту, багатоканальний – кращий за мінімальним часом вимірювання, але складний за кількістю і великою вартістю каналів та, ще є й багатозначність при великому сигналі, багатоетапний – кращий за те, що вміщує як точні етапи, так і ті, що вирішують багатозначність вимірювань.

2. Будь-яке коректне порівняння показників складних систем можливе, якщо порівнюються за одним показником та при однакових інших. З кривих обміну слідує, що порівняння різних систем за часом вимірювання або за іншим показником та при рівних інших неможливе.

3. Введення додаткового показника вартості, реалізує увесь вимірювальний канал системи та дозволяє отримати криві обміну методів вимірювання, що становляться ідентичними за показниками і можуть мати, наприклад, такий же обмін між показниками.

4. Врахування показників якості із загальних позицій і кривих обміну відкриває широкі напрямки розвитку радіоелектронних вимірювачів (вимірювальних і інформаційних каналів) багатошкільних РТІВС.

Список літератури

1. Альошин Г.В. Эффективность информационно-измерительных радиотехнических систем / Г.В. Альошин. – Х., 2005. – 294 с.
2. Алешин Г.В. Эффективность сложных радиотехнических систем / Г.В. Алешин, Ю.А. Богданов. – К., 2008. – 288 с.
3. Альошин Г.В. Оцінка якості інформаційно-вимірювальних систем / Г.В. Альошин. – Х., 2009. – 300 с.
4. Альошин Г.В. Оптимізація цифрових систем передачі / Г.В. Альошин, С.В. Панченко, С.І. Приходько. – Х., 2018. – 160 с.
5. Алешин Г.В. Основы построения оптимальных информационно-измерительных радиотехнических систем / Г.В. Алешин. – Х., 1994. – 252 с.
6. Інформаційна безпека та інформаційні технології; под ред. В.С. Пономаренко / Г.В. Альошин, О.В. Коломійцев та ін. – Х.: ТОВ “ДІСА ПЛЮС”, 2019. – 322 с.
7. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л.С. Гуткин. – М., 1974. – 278 с.

8. Информационные технологии и системы в управлении, образовании, науке: коллективная монография; под ред. В.С. Пономаренко / А.В. Коломийцев и др. – Х.: Цифрова друкарня № 1, 2013. – 278 с.
9. Информационные системы в управлении, образовании, промышленности: коллективная монография; под ред. В.С. Пономаренко / Г.В. Алешин, А.В. Коломийцев и др. – Х.: Вид-во ТОВ “Щедра садиба плюс”, 2014. – 498 с.
10. Информационные технологии и защита информации в информационно-коммуникационных системах: коллективная монография; под ред. В.С. Пономаренко / Г.В. Алешин, А.В. Коломийцев и др. – Х.: Вид-во ТОВ “Щедра садиба плюс”, 2015. – 486 с.
11. Информационные технологии: проблемы и перспективы: коллективная монография; под ред. В.С. Пономаренко / Г.В. Алешин, А.В. Коломийцев и др. – Х.: Вид-во Рожко С.Г., 2017. – 447 с.
12. Kudriashov V. Experimental Evaluation of Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps / V. Kudriashov // *New Approaches in Intelligent Image Analysis*. – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 353-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32192-9_11.
13. Коростелев А.А. Пространственно-временная теория радиосистем / А.А. Коростелев. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
14. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: МАКВИС, 1998. – 828 с.
15. Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
16. Фалькович С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
17. Чумак Б.А. Радиотехнические системы измерения параметров движения / Б.А. Чумак. – Х.: ХВВКИУ РВ, 1990. – 387 с.
18. Шишов В.А. Многоканальная радиолокация с временным разделением каналов / В.А. Шишов, Ю.А. Ворошилов. – М.: Радио и связь, 1987. – 144 с.

References

1. Aloschin, G.V. (2005), “*Effektivnost informacii-vimiruvalnih radiotekhnichnih sistem*” [Efficiency of the informatively-measuring radiotechnical systems], Kharkiv, 294 p.
2. Aloschin, G.V. and Bogdanov, Y.A. (2008), “*Effektivnost slognyh radiotekhnicheskikh system*” [Efficiency of the difficult radiotechnical systems], Kyiv, 288 p.
3. Aloschin, G.V. (2009), “*Ocinka jakosti informacii-vimiruvalnih sistem*” [Estimation of quality of the informatively-measuring systems], Kharkiv, 300 p.
4. Aloschin, G.V., Panchenko, S.V. and Prihodko, S.I. (2018), “*Optimizacija cifrovih sistem peredachi*” [Optimization of the digital systems of transmission], Kharkiv, 160 p.
5. Aloschin, G.V. (1994), “*Osnovi postroenija optimalnih informacii-izmeritel'nykh sistem*” [Bases of construction of the optimal informatively-measuring radiotechnical systems], Kharkiv, 252 p.
6. Aloschin, G.V. and Kolomiitsev, O.V. (2019), “*Informaciina bezpeka ta informaciini tehnologii*” [Informative safety and information technologies], The disa plus, Kharkiv, 322 p.
7. Gutkin, L.S. (1974), “*Optimizacyja radioelektronnykh ustroystv po sovokupnosti pokazateley kachestva*” [Optimization of radio electronic devices on the aggregate of indexes of quality], Moscow, 278 p.
8. Kolomiitsev, A.V. (2013), “*Informatsionnyie tehnologii i sistemi v upravlenii, obrazovanii, nauke*” [Information technologies and systems in management, education, science], Digital printing house No. 1, Kharkiv, 278 p.
9. Aloschin, G.V. and Kolomiitsev, A.V. (2014), “*Informatsionnyie sistemi v upravlenii, obrazovanii, promishlennosti*” [The informative systems in a management, education, industry], The Generous farmstead plus, Kharkiv, 498 p.
10. Aloschin, G.V. and Kolomiitsev, A.V. (2015), “*Informatsionnyie tehnologii i zashita informacii v snformatsionno-kommunikatsionnykh sistemakh*” [Information technologies and protection in the of informatively-communication systems], The Generous farmstead plus, Kharkiv, 486 p.
11. Aleshin, G.V. and Kolomiitsev, A.V. (2017), “*Informatsionnyie tehnologii: problemy i perspektivy*” [Information technology: challenges and perspectives], Rozhko S.H., Kharkiv, 447 p.
12. Kudriashov, V. (2016), Experimental Evaluation of Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps, *New Approaches in Intelligent Image Analysis*, Springer International Publishing Switzerland, pp. 353-373. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32192-9_11.
13. Korostelev, A.A. (1987), “*Prostranstvenno-vremennaja teorija radiosistem*” [Spatio-temporal theory of radio of the systems], Radio and connection, Moscow, 320 p.
14. Shirman, Ja.D., Losev, Y.I. and Minervin, N.N. (1998), “*Radioelektronnyie sistemi. Osnovi postroenija i teorija*” [Radio electronic systems. Bases of construction and theory], Makvis, Moscow, 828 p.
15. Tihonov, V.V. and Harisov, V.N. (1991), “*Statisticheskii analiz i sintez radiotekhnicheskikh ustroystv i sistem*” [Statistical analysis and synthesis of radio of technical devices and systems], Radio and connection, Moscow, 608 p.
16. Falkovich, S.E. and Homjakov, E.N. (1981), “*Statisticheskaja teorija izmeritel'nykh radiosistem*” [Statistical theory of measuring of radio systems], Radio and connection, Moscow, 288 p.
17. Chumak, B.A. (1990), “*Radiotekhnicheskie sistemi izmerenija parametrov dvizhenija*” [Radiotechnical systems of measuring of parameters of motion], KhVVKIURV, Kharkiv, 387 p.
18. Shishov, V.A. and Voroshilov, Y.A. (1987), “*Mnogokanalnaja radiolokacija s vremennim razdeleniem kanalov*” [Multichannel radio-location with TDM], Radio and connection, Moscow, 144 p.

Відомості про авторів:**Альошин Геннадій Васильович**

доктор технічних наук професор
професор кафедри Української державної
академії залізничного транспорту,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1876-7616>

Коломійцев Олексій Володимирович

доктор технічних наук старший науковий співробітник
професор кафедри
Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>

Акулінін Гліб Васильович

кандидат технічних наук
доцент кафедри Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3816-6204>

Клівець Сергій Іванович

кандидат технічних наук
науковий співробітник
Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8109-0639>

Information about the authors:**Gennadiy Aloschin**

Doctor of Technical Sciences Professor
Professor of Ukrainian State
Academy of Railway Transport,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1876-7616>

Oleksii Kolomiitsev

Doctor of Technical Sciences Senior Research
Professor of the Department
of National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>

Glib Akulinin

Candidate of Technical Sciences
Senior Lecturer of Department of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3816-6204>

Sergii Klivets

Candidate of Technical Sciences
Research Associate
of Ivan Kozhedub
Kharkiv National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8109-0639>

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ И СТРУКТУРНЫЙ ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ МНОГОШКАЛЬНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Г.В. Алешин, А.В. Коломийцев, Г.В. Акулинин, С.И. Клевещ

В статье рассмотрены существующие методы измерения радиоэлектронных измерителей (измерительных и информационного каналов радиотехнических систем (РТС)): дискриминаторные (функциональные), панорамные (поиска), многоканальные, многошкальные, многоэтапные и комбинированные. Дискриминаторный (функциональный) метод измерений самый простой в реализации, но, согласно кривой обмена, его точность противоречит большому диапазону измерений. Поэтому появляются другие, более эффективные методы. Из анализа полученных кривых обмена дискриминаторных измерителей можно утверждать, что наименьшая дисперсия погрешности может быть при малом априорном диапазоне измерений и при малой полосе пропускания. То есть, при фазовых методах измерения, при гармоничных сигналах шкалы, которые перекрывают весь диапазон. А наибольшая точность измерений – достигается на наибольшей частоте за счет крутизны сигнала фазовых детекторов. Следовательно, фазовые многошкальные измерители имеют существенное преимущество в экономии энергии сигнала. Отмечено, что каждый измеритель (канал системы) реализует свой метод измерения, отвечает своему принципу действия и строится на множествах параметров, сигналов и структур. Показана возможность постановки и решения задач оптимизации многошкальных радиотехнических информационно-измерительных систем (РТИИС) по критерию максимума точности измерений разных типов систем (каналов) при ограничениях на параметры и стоимость, а также синтез их измерительной структуры и сигналов на трех множествах (параметрах, сигналах и структурах). Акцентируется внимание на то, что введение показателя стоимости позволяет, прежде всего, классифицировать, согласно кривых обмена, все многошкальные РТИИС на допустимые, рациональные и оптимальные, что упрощает их проектирование и впервые является основой для оценивания их реализации. Представлены методы получения кривых обмена качества радиоэлектронных измерителей. Получены аналитические выражения для выбора метода измерения, структуры и параметров радиоэлектронных измерителей (каналов) для РТИИС с панорамным, многоканальным, многоэтапным и многошкальным методами измерения с одновременными (последовательными) шкалами во времени.

Ключевые слова: радиоэлектронный измеритель, измерительный канал, радиотехническая система, многошкальность, неоднозначность измерений, методы измерения, эффективность, стоимость, кривые обмена.

**PARAMETRIC AND STRUCTURAL OPTIMAL SYNTHESIS OF THE MULTISCALE
RADIOTECHNICAL INFORMATIVELY-MEASURING SYSTEMS**

G. Alosin, O. Kolomiitsev, G. Akulinin, S. Klivets

In the article the existent methods of measuring of radio electronic measuring devices (instrumentation and informative channels of the radiotechnical systems) are considered: discriminator (functional), panoramic (search), much channel, much scale, much stage and combined. Discriminator, or functional, the method of measuring is the simplest in realization, but, in obedience to the curve of exchange, his exactness conflicts with the large range of measuring. Other more effective methods appear therefore. It is possible to assert from the analysis of the got curves of exchange of discriminator measuring devices, that the least dispersion of error can be at a priori small range of measuring and at the small stripe of key-in. Id est, at the phase methods of measuring, at harmonious signals scales that recover all range. And most exactness of measuring - arrived at on most frequency due to the steepness of signal of phase detectors. Consequently, phase multiscale measuring devices have substantial advantage in the economy of energy of signal. It is marked that every measuring device (channel of the system) will realize the method of measuring, answers the principle of action and built on the great numbers of parameters, signals and structures. Possibility of raising and decision of tasks of optimization is shown many scale radiotechnical informatively-measuring systems on the criterion of a maximum of exactness of measuring of different types of the systems (channels) at limits on parameters and cost, and also synthesis of their measuring structure and signals on three great numbers (parameters, signals and structures). It is marked that introduction of index of cost allows, foremost, to classify, in obedience to the curves of exchange, all much scale radiotechnical informatively-measuring systems on possible, rational and optimal, that simplifies their planning and first is basis for the evaluation of their realization. The methods of receipt of curves of exchange of quality of radio electronic measuring devices are presented. Analytical expressions are got for the choice of measuring method, structure and parameters of radio electronic measuring devices (channels) for radiotechnical informatively-measuring systems with panoramic, much by a channel, much stage and much by a scale measuring methods with simultaneous (successive) scales in time.

Keywords: radio electronic measuring device, measuring channel, radiotechnical system, multiscale, ambiguousness of measuring, measuring methods, efficiency, cost, curves of exchange.