ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1991

Seria: z. 114 Nr kol. 1031

Jerzy JAKUBIEC
Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechniki Śląskiej

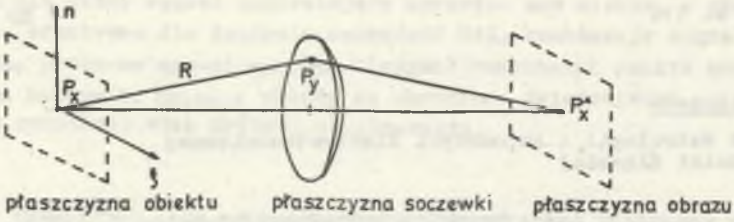
O PEWNEJ KONCEPCJI DEFINIOWANIA BŁĘDU SYSTEMATYCZNEGO PROCESU UZYSKIWANIA OBRAZU UŻYTECZNEJ W MIERNICTWIE DYNAMICZNYM

Streszczenie. Uzyskanie obrazu jest procesem pomiaru wielkości wielowymiarowej. W jednym ze sposobów praktycznej realizacji tego procesu stosuje się programowe odtwarzanie obrazu na podstawie pomiaru jego projekcji czyli przetworzonej fizycznie wielowymiarowej wielkości wejściowej. W artykule przedtawiono obrazowanie jako proces deterministyczny składający się z dwóch podstawowych faz: przetwarzania fizycznego (analogowego) oraz programowego odtwarzania, realizowanego jako rozwiązywanie funkcji odwrotnej do funkcji opisującej przetwarzanie fizyczne. Przyjęto definicję systematycznego błędu przetwarzania a następnie wykazano, że dla takiej definicji błędu odtwarzanie może być traktowane jako eliminowanie systematycznego błędu przetwarzania z wyniku końcowego. Pokazano również, że zastosowanie przyjętej definicji do opisu błędu systematycznego przetwarzania wielkości dynamicznej prowadzi, dla wielkości zależnych jedynie od czasu, do uzyskania stosowanej w miernictwie dynamicznym definicji dynamicznego błędu chwilowego.

1. Wprowadzenie

Podstawowe fazy procesu obrazowania można scharakteryzować [5], posługując się pojęciami stosowanymi do opisu tradycyjnie realizowanego zadania uzyskiwania obrazu optycznego za pomocą soczewki, przedstwionego na rys. 1. Zakładając, że światło emitowane z obiektu dwuwymiarowego jest koherentne i monochromatyczne o pulsacji ω, obraz $P_{\hat{x}}$ każdego punktu P_x obiektu jest dokładny, jeżeli fale świetlne wychodzące z punktu P_x docierają do $P_{\hat{x}}$ zgodne w fazie. Jednak fale biegnące pod pewnym kątem w stosunku do osi soczewki przebywają drogę R dłuższą niż fale równoległe do osi, są zatem opóźnione w fazie o $\omega R/c$ w stosunku do tych drugich (c jest prędkością światła). W tej sytuacji otrzymanie obrazu dokładnego jest możliwe, jeżeli soczewka wyrównuje długości dróg wszystkich promieni na drodze od obiektu do obrazu.

Każdy punkt P_x orginału (obiektu) ma swoje odwzorowanie w płaszczyźnie soczewki w postaci zbioru punktów P_y, tworzącego tzw. projekcję punktu P_x. Suma projekcji poszczególnych punktów tworzy projekcję obiektu. Zadanie, które spełnia soczewka, można zatem określić następująco: odtwarza ona obrazy poszczególnych punktów obiektu na podstawie projekcji cząstkowych.



Rys.1 Ilustracja otrzymywania obrazu optycznego
Fig.1 Ilustration of obtaining the optic image

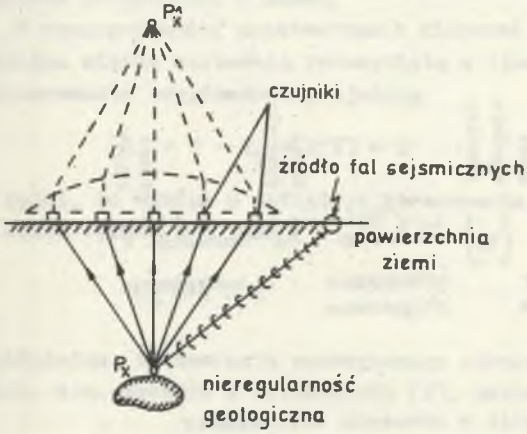
Można w takim razie powiedzieć, że każdy punkt obiektu jest odwzorowany w każdym punkcie projekcji i każdy punkt obrazu powstaje przez przetworzenie wszystkich punktów projekcji. Zatem modelem matematycznym zarówno procesu tworzenia projekcji jak i odtwarzania są równania całkowe lub różniczkowe.

W procesie obrazowania, w którym sygnałem jest fala akustyczna lub elektromagnetyczna o częstotliwości spoza zakresu widzialnego, ostatnie ogniwo służy do wizualizacji obrazu. W pewnych przypadkach zadanie to realizuje się umieszczając w płaszczyźnie obrazu matrycę czujników przetwarzających poszczególne punkty obrazu na sygnał elektyczny, który z kolei może być łatwo użyty do wytworzenia obrazu widzialnego. Jednak w ostatnich latach dominujący staje się sposób, w którym informacji pomiarowej o obiekcie nie uzyskuje się przez pomiar obrazu lecz przez pomiar projekcji [5]. Przykładowe zastosowanie tego sposobu do obrazowania struktur geologicznych pokazano na rys.2.

Fala sejsmiczna, wywoływana na powierzchni ziemi, odbija się od nieregularności struktur geologicznych i jako echo odbierana jest przez matrycę czujników umieszczonych na powierzchni ziemi, czyli w płaszczyźnie projekcji. Funkcję soczewki spełnia w takim przypadku program komputera przetwarzającego dane z czujników lub matryca mikroprocesorów sprzężonych indywidualnie z każdym czujnikiem [5].

Przedstawiony na powyższym przykładzie sposób można nazwać obrazowaniem z programowym odtwarzaniem obrazu. Zastępując programem urządzenie spełniające funkcję soczewki uzyskuje się dwa istotne efekty: usuwa się z łańcucha przetwarzania element fizyczny, wprowadzający dodatkowe źródła błędów a ponadto trudny do realizacji, oraz uzyskuje się urządzenie o zaletach właściwych dla techniki programowej. Jednak złożoność działań numerycznych służących do odtwarzania jest z reguły bardzo duża, co stwarza konieczność stosowania komputerów o dużej mocy obliczeniowej lub systemów wieloprocesorowych. Mimo tego można sądzić, że to właśnie sposób oparty na programowym odtwarzaniu, należący do szerokiej klasy tzw. zadań odwrotnych rozważanych m.in. w pracach [1] [7], w których numeryczne

rozwiązywania jest intensywnie rozwijane w ostatnim okresie, będzie w przyszłości stanowił podstawową zasadę budowy praktycznych systemów obrazowania. Już obecnie zasadę tę wkorzystuje się w wielu dziedzinach, takich jak: tomografia komputerowa, nieniszczące badania materiałów, badania geofizyczne i w wielu innych [5].



Rys.2 Zasada otrzymywania obrazu sejsmicznego
Fig.2 Principle of obtaning the seismic image

2. Obrazowanie jako proces przetwarzania pomiarowego

Obrazowanie można przedstawić jako ciąg operacji przetwarzania pokazany na rys.3. Wielowymiarowa wielkość X, opisująca obiekt przestrzennie i w funkcji czasu, jest przetwarzana fizycznie w projekcję Y zgodnie z zależnością

$$Y = f(X) \qquad (1)$$

nazywaną równaniem przetwarzania. Dla przykładu z rys.2 jest to zależność między wielkością opisującą rozmieszczenie warstw skalnych a jej projekcją na powierzchni ziemi w postaci pewnych parametrów fal sejsmicznych.

Dyskretny obraz wielkości mierzonej otrzymywany jest drogą programową jako ciąg obliczeń przeprowadzanych na wynikach pomiaru dyskretnych wartości projekcji. Istota tych obliczeń polega na rozwiązywaniu odwrotnego równania przetwarzania

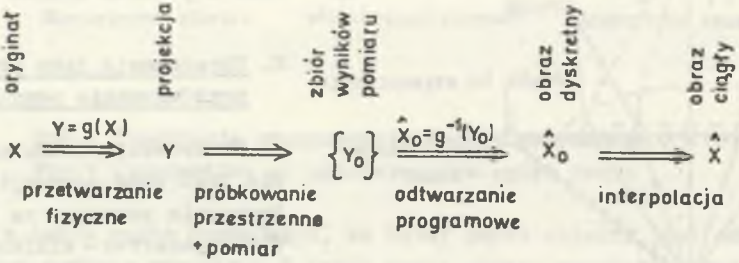
$$\hat{X} = f^{-1}(Y) \qquad (2)$$

w sposób dyskretny (w punktach pomiaru projekcji). Obraz ciągły uzyskiwany jest w razie potrzeby drogą interpolacji obrazu dyskretnego.

Dalsze rozważania ograniczone są do analizy błędu systematycznego dwóch podstawowych faz obrazowania tj. przetwarzania oryginału w projekcję i następnie projekcji w obraz (odtwarzania), opisywanych w sposób ciągły odpowiednio równaniami (1) i (2) oraz traktowanych jako deterministyczny model procesu obrazowania. Omówienie problemów pomiarowych związanych z próbkowaniem przestrzennym, kwantowaniem oraz interpolacją obrazu można znaleźć w pracy [4].

Obrazowanie jest procesem pomiarowym - jego celem jest pośredni pomiar wielkości wielowymiarowej w taki sposób, aby wartości wielkości wyjściowej $\hat{X}$ stanowiły odpowiednio dokładne oceny wielkości wejściowej X w

każdym punkcie przestrzeni i czasu. Zatem poszczególne ogniwa procesu obrazowania muszą być traktowane bądź jako fizyczne przetworniki pomiarowe (dla przykładu z rys.2 są to warstwy ziemi między obiektem a powierzchnią ziemi), bądź jako układy realizujące programowe przetwarzanie wyników pomiarowych.



Rys.3 Łańcuch operacji w procesie obrazowania
Fig.3 Operation chain in the image obtainment

W obu przypadkach podstawowym problemem analizy metrologicznej jest wydzielenie źródeł błędów poszczególnych ogniw procesu przetwarzania. Dla deterministycznego opisu procesu przetwarzania są to źródła błędów systematycznych.

3. Błąd systematyczny procesu obrazowania

Jak to wykazano powyżej pierwszą fazę procesu obrazowania można traktować jako przetwarzanie analogowe wielkości wielowymiarowej. Błąd przetwarzania przetwornika określa się porównując jego równanie przetwarzania z równaniem przyjętym za idealne. Z reguły równanie idealne określa się jako

$$Y_i = \frac{1}{C} X \tag{3}$$

gdzie C jest stałą przetwarzania i w tym przypadku może być interpretowana jako liczba, przez którą należy przemnożyć cyfrowe wyniki pomiaru projekcji tak, aby wyrażały one wartości wielkości wejściowej w przyjętych jednostkach tej wielkości. Biorąc pod uwagę, że łatwo można osiągnąć wartość C=1 przez wstępne przemnożenie wyników przez C, przyjmuje się dla uproszczenia rozważań, że idealne równanie przetwarzania ma postać

$$Y_i = X \tag{4}$$

co oznacza, że wartości wielkości wyjściowej przetwornika idealnego wyrażają wprost wartości wielkości mierzonej. Dla procesu obrazowania zależność (4) oznacza, że idealna projekcja jest równa oryginałowi w każdym punkcie przestrzeni i czasu.

W rzeczywistości przetwarzanie fizyczne opisywane jest równaniem (1). Różnica między wartością rzeczywistą a idealną stanowi błąd systematyczny odwzorowania oryginału w projekcję

$$\delta_y = Y - Y_i = f(X) - X \tag{5}$$

Z kolei, co wynika z definicji obrazowania, błąd przetwarzania oryginału w obraz wyraża się jako

$$\delta_{\hat{X}} = \hat{X} - X \tag{6}$$

Zakładając, że operacja numerycznego odtwarzania przeprowadzane są dokładnie, tzn. zgodnie z zależnością (2), zachodzi

$$\delta_{\hat{X}} = f^{-1}(Y) - X = f^{-1}\left[f(X)\right] - X = 0 \tag{7}$$

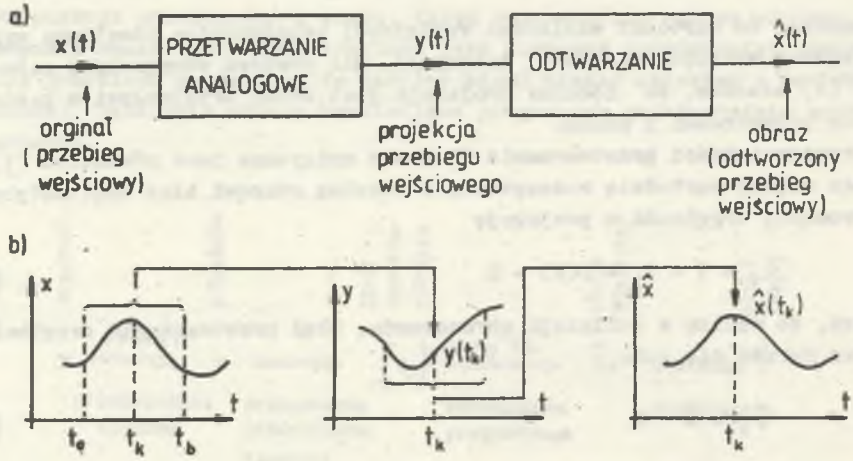
Oznacza to, że zdefiniowany równaniem (5) błąd systematyczny, powstający podczas przetwarzania analogowego, jest eliminowany z wyniku pomiaru projekcji w trakcie procesu odtwarzania.

Przykład

Uzyskiwanie dynamicznego przebiegu wejściowego przetwornika pomiarowego na podstawie jego przebiegu wyjściowego może być traktowane jako zagadnienie obrazowania - otrzymuje się "obraz czasowy" wielkości "zerowymiarowej" przestrzennie zależnej od czasu (rys.4). W warunkach dynamicznych związek między wielkością wejściową a wyjściową przetwornika analogowego opisany jest równaniem różniczkowym. Oznacza to, że zachodzą tego samego rodzaju związki między odpowiednimi wielkościami co w przykładach pokazanych na rys.1 i 2. Dowolny punkt przebiegu wyjściowego (projekcji), oznaczony na rys.4b symbolem $y(t_k)$, jest związany teoretycznie z wszyskimi wartościami przebiegu wejściowego; praktycznie dla określonej dokładności przetwarzania - z wartościami z pewnego obszaru wokół chwili t_k o granicach oznaczonych symbolami t_a i t_b. Podobna zależność zachodzi między przebiegiem wyjściowym $y(t)$ i odtworzonym $\hat{x}(t)$.

Stosując przyjętą definicję błędu systematycznego do określenia błędu przetwarzania wielkości dynamicznej, otrzymuje się, zgodnie z wzorem (5)

$$\delta_y = y - y_i = y(t) - x(t) \tag{8}$$



Rys.4 Uzyskiwanie obrazu przebiegu dynamicznego
a) schemat blokowy toru przetwarzania
b) ilustracja współzależności faz przetwarzania

Fig.4 Obtainment of the image of a dynamic process
a) block diagram of the processing chain
b) ilustration of the interdependence of processing stages

Wyrażenie to dla czułości statycznej przetwornika S≠1 przyjmuje postać

$$\delta_y = \frac{1}{S}\, y(t) - x(t) \tag{9}$$

która jest nazywana chwilowym błędem dynamicznym przetwornika pomiarowego [2].

Podsumowując można stwiedzić, że pomiar przebiegu wielkości dynamicznej daje się przedstawić jako proces obrazowania. Stosując przyjętą definicję błędu systematycznego uzyskuje się w tym przypadku wyrażenie na dynamiczny błąd chwilowy. Błąd ten w drugiej fazie - odtwarzania - jest eliminowany z wielkości y(t), można zatem mówić o korekcji błędu dynamicznego drogą odtwarzania przebiegu wejściowego. Podobne koncepcje odnoszące się ogólnie do systematycznego błędu przetwarzania zawierają prace [3], [6].

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych w artykule rozważań można sformułować następujące wnioski:

- przetwarzanie oryginału w projekcję zgodnie z zależnością (1), różną od idealnej (4), jest przyczyną powstawania błędu systematycznego opisywanego ogólnie równaniem (5),

- realizacja kolejno po sobie następujących operacji przetwarzania i odtwarzania daje w wyniku ocenę wielkości mierzonej pozbawioną błędów systematycznych,
- wynikiem numerycznego odtwarzania jest wyeliminowanie błędów systematycznych z wyznaczonej oceny, zatem zgodnie z pojęciem tradycyjnej metrologii odtwarzanie jest równoznaczne z korekcją błędów systematycznych - można wręcz mówić o korekcji drogą odtwarzania (rozwiązywania odwrotnego równania przetwarzania [3]).

LITERATURA

[1] Głasko W.G.: Obratnyje zadaczi matiematiczeskoj Fiziki. Izdat. MGU, 1984

[2] Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1984

[3] Jakubiec J.: Specificity of Measurement Problems of Intelligent Trasducer. X-th IMEKO World Congress, Praha 1985. Vol.3

[4] Mesch F.: Sampling, Scanning and Interpolation Errors in Digital Processing of Two-Dimensional Signals.Proc. IMEKO Symposium on Computerized Measurement, Dubrovnik 1981

[5] Mesch F.: System Description of Imaging Methods - An Introduction. Proc. X-th IMEKO World Congress, Praha 1985, Vol.2

[6] Piotrowski J.: Teoria pomiarów, PWN, Warazswa 1986

[7] Wasilienko G.I. Tieorija wosstanowlenija signałow. Izdat. Sow. Radio, 1979

Recenzent: dr. hab. inż. Roman Rymaszewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 29 XI 1988 r.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИГОДНОГО В ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Р е з ю м е

Получение изображения является процессом измерения многомерной величины. В одном из способов практической реализаци этого процесса используется программное восстановление образа на основании измерения его проекции или преобразованной физически многомерной входной величины. В статье представлено изображение как детерминистический процесс, состоящий из двух основых этапов: физического аналогового преоразования, а также программного восстановления реализуемого в виде решения обратной функции по отношению к функции, описывающей физическое преобразование. Дана формулировка систематической погрешности преобразования и доказано, что в этом случае процесс восстановления можно считать как исключение систематической

погрешности из последнего результата. Показано, что использование принятой формулировки для описания систематической погрешности динамической величины ведёт, для величин зависимых только от времени, к получению используемой в динамических измерениях формулировки мгновенной динамической погрешности.

A CONCEPTION OF DEFINING SYSTEMATIC ERROR OF IMAGE OBTAINMENT PROCESS USEFUL IN DYNAMIC MEASUREMENTS

S u m m a r y

Image obtainment is the process of multidimensional quantity measurement. In one of the methods of practical realization of this process, programmable image reconstruction on the basis of measuring its projection, i.e. physically processed multidimensional input quantity, is used. The image obtainment has been presented in the paper as a deterministic process composed of two basic stages: the physical (analog) processing and the programmable reconstruction carried out as solving the function inverse to the function describing the physical processing.
A definition of the systematic error of the processing has been assumed and then it has been proved that for such a definition the reconstruction can be treated as a reduction of the systematic error from the final result. It has been shown that the application of the assumed definition for describing the systematic error of the dynamic quantity processing leads, for quantities being a function of the time only, towards obtaining the definition used in dynamic measurements for describing the instantaneous dynamic error.