

HENRYK Z. KOWALSKI

535.317.1:535.41/.42

Wykorzystanie interferencji światła spójnego (zarejestrowanego pola interferencyjnego) do pomiaru wielkości liniowej i kątowej

1. Wstęp

Istnieją dwie podstawowe wielkości geometryczne podlegające pomiarowi — długość i kąt. Wielkości te i ich pomiar są istotne dla ilościowego (cyfrowego) przedstawienia wielu zjawisk zachodzących w procesie wytwórczym człowiek — narzędzie. Jeśli rozwój radiolokacji oraz rozwój techniki laserowej rozwiązują zagadnienie pomiaru długości, w szczególności na większe odległości, to pomiar kąta i pomiar długości na krótkich odcinkach należą do tych operacji, gdzie postęp jest niezadawalający. Dlatego w wielu ośrodkach badawczych trwają poszukiwania nowych rozwiązań pomiaru kąta oraz długości i zmierzają one w kierunku automatyzacji. Do dziedzin nauki i techniki, w których zapotrzebowanie na automatyzację pomiaru kąta oraz długości daje się szczególnie odczuć należą: automatyka przemysłowa, nawigacja, radiolokacja, geodezja i fotogrametria.

Zaspokojenie wymagań dokładnościowych geodezji pozwoli zaspokoić potrzeby pozostałych dziedzin.

Kierunek rozwoju w dziedzinie automatyzacji pomiarów w geodezji i kartografii jest nierozdzielnie związany z opracowaniem i przesyłaniem informacji do innych urządzeń stosowanych powszechnie w technice¹.

W ostatnich latach informacja jest przekazywana w sposób nieciągły. Ta nieciągła forma przekazywania informacji w cyfrowych maszynach liczących przyjmuje postać cyfr. Wielkości wyjściowe, pośrednie i wyjściowe przedstawione są w postaci wartości cyfrowych, które realizuje się za pomocą kodu (szyfru)².

Konstruowane maszyny elektroniczne pracują z reguły w kodzie dwójkowym. Klasyczne rozwiązania kręgów podziałowych pozwalają na uzyskanie zapisu wyników w układzie dziesiętnym. Wykorzystanie więc szybkiej i nowoczesnej techniki obliczeniowej wymaga dodatkowego przetworzenia danych polowych i zakodowania ich w układzie dwójkowym.

¹ Van Gent H. L., Netherlands, A.: *Automations in Geodesy* 10. September 1968 subject Computation and Automation 519 Kongres FIG London.

² Gitis E. T.: *Konwertery informacji do maszyn cyfrowych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1964 r.

Opracowano więc systemy kodów na kręgach teodolitów, które tę niedogodność usuwają, a teodolity takie przyjęto nazywać „kodowymi”³. Możemy powiedzieć, że celem działania takich systemów jest zamiana odkształcenia skrętnego na sygnał cyfrowy⁴.

Zamianę odkształcenia skrętnego na sygnał cyfrowy można dokonać na drodze elektro-mechanicznej, magnetycznej, optycznej lub elektro-indukcyjnej.

Największe możliwości ze względu na uzyskaną dokładność znalazły urządzenia z kodem czytany optycznie, a w szczególności kody cykliczne zwane kodami Greya⁵.

Przy praktycznym wykonaniu kodów na dyskach wylaniają się bariery ograniczające, które można sprowadzić do trudności technologicznych związanych z precyzyjnym naniesieniem poszczególnych działek kodu z dokładnością rzędu sekund⁶. Ostatnie wartości kąta minuty i sekundy otrzymywane są w technice analogowej. Ilustracją powyższej techniki pracy może być teodolit firmy Fenell, lecz wymaga to i tak najwyższej precyzji stosowanych urządzeń⁷.

Teodolit firmy Fenell jest konstrukcją, w której w sposób konsekwentny zmierzano do zautomatyzowania pomiarów i miał on określone miejsce w zestawie urządzeń, które proces pomiarowy miały kończyć gotowym opracowaniem w postaci współrzędnych lub mapy.

Zamierzenie to zostało osiągnięte, lecz tradycyjny teodolit jest na tyle uniwersalny, że może być przeznaczony do wielu zadań między innymi np. w pomiarach realizacyjnych, gdzie informacja o wartości mierzonego kąta jest potrzebna natychmiast. Dlatego opracowano cały szereg innych rozwiązań^{8,9}.

Jednym z bardziej oryginalnych jest metoda określenia kąta jako funkcji pomiaru czasu obrotu wycinka koła. Punktem wyjścia dla tego rozwiązania jest przekonanie, że w obecnej chwili pomiar czasu jest parametrem, którego dokładność trzeba uznać za najwyższą. W rozwiązaniu kon-

³ Kowalski H. Z.: *Teodolity kodowe*. Referat na sesji Naukowo-technicznej „Aktualne zagadnienia geodezji”. Nowy Sącz 25—27.X.1971 r. (Materiały z Konferencji) str. 25—30.

⁴ Kowalski Henryk Z.: *Automatyczny pomiar kąta teodolitem impulsowym (cyfrowym) polskiej konstrukcji*. Geodezja i Kartografia nr 2/72, str. 111—121.

⁵ Bogaerts M. J. M.: Praca doktorska wykonana w 1969 r. w Delft w Holandii pt. *A self-reducing range — finder with an automatic registration system*.

⁶ Reluga J.: *O metodach wykonywania tarcz kodowych wysokiej dokładności do optycznych przetworników analogowo-cyfrowych*. Automatyka i kontrola, Warszawa 1954 nr 7.

⁷ Lang D. R.: Germany, 4 September 1968, Now Instruments, Kongres FIG London.

⁸ Hauf M.: *Snimami polohy zamerno u digitaniech teodolitu*. Geodeticky a kartograficky obzor Praha, Srepen 1970, str. 191—199.

strukcyjnym ze względu na stabilizację obrotów dysków podziałowych zadanie się komplikuje i jak dotąd nie podjęto produkcji na skalę przemysłową. Instrumentem drugiej generacji w dziedzinie automatyzacji pomiarów jest instrument wyprodukowany przez firmę Zeiss Opton — Reg Elta 14, który umożliwia pomiar kąta poziomego, pionowego oraz odległości. Informację o mierzonej wielkości otrzymujemy w postaci cyfrowej⁹. Zachodzący postęp w technologii elektronowej i związana z tym miniaturyzacja elementów pozwoliła proces automatyzacji doprowadzić do takiej postaci, jak w instrumencie AGA 710.

Wspomniane wcześniej trudności natury technologicznej w pracach nad otrzymaniem kodów, które pozwoliłyby na odczyt wartości minut i sekund z limbusem bez dodatkowych operacji, były impulsem dla autora do rozpoczęcia prac nad wykorzystaniem nośnika magnetycznego na trwale związanej z powierzchnią toczną dysku do zapisania na niej podziałki kątowej. Prace te doprowadziły do opracowania wynalazku¹⁰. Próba zastosowania tej podziałki oraz diody świecącej (elektroluminescencyjnej) w Polsce, wykonanej przez zespół prof. Mroziwicza z Instytutu Techniki Elektronowej w połowie lat sześćdziesiątych, jako źródła światła sygnalizującego cel i diody krzemowej jako detektora, pozwoliły po raz pierwszy w świecie dokonać pomiaru kąta w warunkach dynamicznych. Na bazie adaptowanego teodolitu radzieckiego TT-50 uzyskano dokładność 1 minuty, a przy wykorzystaniu konstrukcji teodolitu PZO T-30 uzyskano dokładność 26" ¹¹.

Jak wiadomo, pomiar kąta teodolitem można sprowadzić do następujących operacji:

1. Skierowania lunety na kolejne cele i doprowadzenie do bisekcji celów krzyżem kresek lunety.

2. Uruchomienie płaszczyzny kolimacji narzędzia kątomierczego w momencie uzyskania bisekcji celów.

3. Dokonanie z limbusem odczytów odpowiadających położeniu lunety w chwili bisekcji celów.

4. Obliczanie kąta przez wykonywanie pewnych działań arytmetycznych na liczbach przedstawiających odczyty uzyskane w p. 3.

⁹ Schellens D.F.: New Zeiss electro-optical instrumentation Journal of the Surveying and Mapping Division New York, September 1970, no Su 2.

¹⁰ Kowalski H.Z., Galiński J.J.: Patent PRL nr 54755 *Urządzenia do impulsowego pomiaru kątów oraz sposób wykonania podziałki tego urządzenia*.

¹¹ Kowalski H.Z.: Praca doktorska, Warszawa, czerwiec 1970 r. *Analiza dokładności automatycznego pomiaru kąta kątomierzem impulsowym własnej konstrukcji oraz badanie możliwości jego zastosowania do kontroli stałości budowli wodno-melioracyjnych*.

Ze względu na obowiązującą w geodezji zasadę wielokrotnego pomiaru mierzonej wielkości, oprócz wymienionych czterech czynności należy dokonać jeszcze piątej, związanej ze zmianą w położeniu limbusem pomiędzy poszczególnymi pomiarami tego samego kąta.

Jeśli przeanalizujemy poszczególne operacje pomiaru kąta ze względu na możliwości ich automatyzacji, to okaże się, że podstawowy problem, jaki należy rozwiązać, łączy się z punktem trzecim, a więc wykonaniem takiego limbusem, który by zapewniał odpowiednią dokładność wykonania podziałki na limbusie i jej czytanie przez urządzenia eliminujące z tej operacji człowieka. Jak wykazano to w pracy autora ¹¹, klasyczna technika wykonania limbusem drogą mechaniczną sprowadzała się do naniesienia podziałki o wartości nominalnej rzędu kilku dziesiątków minut. Jak wiadomo, przez zastosowanie mikroskopów skalowych i koincydencyjnych uzyskuje się dalszy wzrost dokładności pomiarów.

I tak: zastosowanie teodolitów kodowych pozwala uzyskać nominalną wartość 1 działki limbusem rzędu kilku minut. Wykonane limbusy według koncepcji autora na warstwie magnetycznej pozwoliły osiągnąć wartość 26'' dzięki zastosowaniu zawieszenia aerodynamicznego głowic użytych do zapisu i czytania podziałki ¹².

Sygnalizowane przez autora prace nad noniusem elektronicznym, podane w publikacji, wskazywały na możliwość uzyskania na tej drodze dokładności rzędu pojedynczej sekundy.

Wyprodukowany przez firmę japońską Sokkista Limited w 1973 r. teodolit magnetyczny jest dobrą ilustracją uzyskanych rezultatów w tym zakresie.

Poszukiwania autora nad materiałami i metodami nadającymi się do zapisu podziałki o dużej gęstości znaków spowodowały podjęcie prac badawczych nad zapisem informacji na materiałach wysokorozdzielczych, stosowanych w holografii ^{13,14,15,16}.

¹² Parvi S.: *Optymalizacja Konstrukcji i warunków pracy głowicy z podparciem aerodynamicznym o jednym stopniu swobody dla pamięci bębnowych*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska 1968 r.

¹³ Kowalski H.Z., Dubik A.: *Kierunki zastosowań optyki światła spójnego i holografii w geodezji i kartografii*. Prace IGiK. Tom XXII, Zeszyt 1/50, 1975 r.

¹⁴ Dubik A., Kowalski H.Z.: *Wpływ sposobu rejestracji i rekonstrukcji obiektu na niektóre parametry obrazów odtwarzanych z hologramu*. Prace IGiK. Tom XII, Zeszyt 2(51) 1975 r.

¹⁵ Dubik A., Kowalski H.Z.: *Sposoby rejestracji, rekonstrukcji i pomiaru hologramów dla celów fotogrametrycznych*. Prace IGiK. Tom XXIII, Zeszyt 1(52), 1976 r.

¹⁶ Opracowanie metody i urządzeń do holograficznego zapisu informacji kreskowych i tonalnych. Plan prac naukowo-badawczych Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie w roku 1975 i 1976.

Autor pracy jako kierownik grupy badawczej w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie, w latach 1974—76 prowadził badania nad metodami i urządzeniami do cyfrowego pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych¹⁷.

Efektom badań na tym polu są:

— Interferencyjna metoda zapisu podziałki liniowej o zadanej gęstości na wysokorozdzielczej emulsji fotograficznej.

— Opracowanie sposobu i urządzenia do pomiaru liczby linii na podziałce w postaci konwertera (przetwornika) wielkości liniowej na postać cyfrową.

— Opracowanie i wykonanie podziałek przydatnych w teodolitach cyfrowych na drodze przetworzenia podziałki liniowej na podziałkę radialną.

2. Interferencyjna metoda zapisu podziałki liniowej o zadanej gęstości na wysokorozdzielczej emulsji fotograficznej

2.1. Istota metody

Istota metody sprowadza się do wykorzystania zjawiska interferencji dwóch wiązek światła spójnego, a przez zapis stanu tych wiązek w płaszczyźnie kliszy fotograficznej (hologramu) otrzymuje się podziałkę liniową o dużej gęstości (teoretycznie około 10 000 l/mm) i dokładności. Otrzymanie w sposób konwencjonalny podziałki liniowej o takiej gęstości i dokładności jest praktycznie dotychczas niemożliwe, jak wynika to z literatury przytoczonej w rozdziale 1.

2.2. Ogólne uwagi o interferencji światła doskonale spójnego

Interferencja jest zjawiskiem typowym dla wszelkich procesów falowych i jest w literaturze znana (np. 18, 19). Dla zobrazowania eksperymentów przeprowadzonych w IGiK, związanych z wykonaniem podziałek, i dla dokonania analizy skorzystamy w rozważaniach z interferencji światła doskonale spójnego.

Do interferencji zdolne są dowolne wiązki światła, jednak stabilne i kontrastowe obrazy interferencyjne, a takie tylko potrafimy rejestrować

¹⁷ Opracowanie metod i urządzeń do bezpośredniego cyfrowego pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych. Plan prac nauk.-bad. IGiK w latach 1974—1977.

¹⁸ Weizel Walter: *Fizyka teoretyczna*. Warszawa 1960 PWN.

¹⁹ Lenthurst R. S.: *Geometrical and Physical Optics*. Longman Group Limited. London 1973.

i następnie badać, mogą powstać w przypadku nakładania się wiązek wzajemnie spójnych. Własności takie mają wiązki o ściśle określonej długości fali i wyemitowane z punkowego źródła światła. Własności te są szczególnie użyteczne w przypadku podziałek, ponieważ zawierają w sobie wzorce przydatne dla celów pomiarowych.

Pole elektryczne fali elektromagnetycznej wybranego punktu o współrzędnych $\vec{r}$ wywołuje zjawiska optyczne.

Opisujemy je wprowadzając zespoloną wielkość wektorową $\vec{v}$.

$$\vec{v}(\vec{r}, t) = \vec{a}(\vec{r}) e^{i(\vec{r} \cdot \vec{r} + 2\pi \nu t)}, \quad (1)$$

gdzie: $\vec{a}(\vec{r})$ — jest amplitudą pola,
 φ — faza w momencie $t = 0$,
 ν — częstość oscylacji.

Natężenie światła I , na którą to wielkość reagują powszechnie stosowane fotodetektory, dane jest kwadratem.

$$I = \vec{v} \vec{v}^* = (\vec{a}(\vec{r}) e^{i(\vec{r} \cdot \vec{r} + 2\pi \nu t)}) \cdot (\vec{a}(\vec{r}) e^{-i(\vec{r} \cdot \vec{r} + 2\pi \nu t)}) = (\vec{a} \cdot \vec{a}), \quad (2)$$

gdzie: „ $\cdot$ ” oznacza iloczyn skalarny dwóch wektorów,

$\vec{a}(\vec{r})^*$ wielkość zespolona sprzężona.

Kiedy interferują dwie fale

$$\vec{v}_1 = \vec{a}_1 e^{i(\varphi_1 + 2\pi \nu t)} \quad \text{ i } \quad \vec{v}_2 = \vec{a}_2 e^{i(\varphi_2 + 2\pi \nu t)}$$

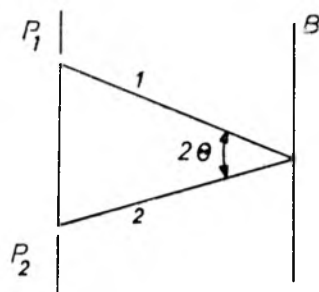
natężenie światła, zgodnie z zasadą superpozycji, dane jest wzorem

$$I = (\vec{v}_1 + \vec{v}_2) (\vec{v}_1 + \vec{v}_2)^* = I_1 + I_2 + 2\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

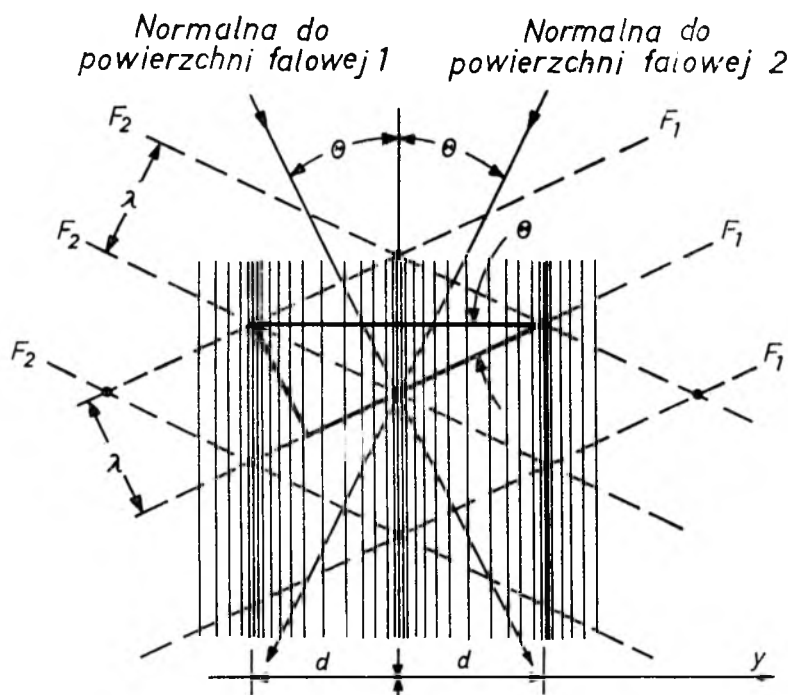
Jak wynika z wzoru (3), natężenie światła w dowolnym punkcie obrazu interferencyjnego, powstałego w wyniku nałożenia się dwóch fal, dane jest sumą natężeń poszczególnych fal i składnika interferencyjnego. Składnik ten zawiera informację o różnicy faz i podobnie jak pozostałe nie zależy od czasu. Oznacza to stabilność obrazu interferencyjnego. Aby składnik $2\vec{a}_1 \cdot \vec{a}_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ nie był równy zero, wektory $\vec{a}_1$ i $\vec{a}_2$ nie mogą być do siebie prostopadłe. Wynika z tego, że dwie fale spolaryzowane liniowo w kierunkach wzajemnie prostopadłych nakładając się nie dają obrazów interferencyjnych. Z wzoru (3) widać, że przy ustalonych natężeniach wiązek, np. $\vec{v}_1 = \vec{v}_2$, obraz jest najbardziej kontrastowy, gdy $\vec{a}_1 \parallel \vec{a}_2$ (polaryzacja fal liniowa, wzajemnie równoległa); maksymalna różnica natężeń w obrazie interferencyjnym wynosi wówczas $4 I_1$. Kiedy posługujemy się światłem laserowym, przypadek polaryzacji liniowej wzajemnie równoległej występuje najczęściej. Pozwala to na przejście od opisu wektorowego do skalarnego.

Obecnie, jako przykład najbardziej przydatny dla naszych celów, opiszemy obraz interferencyjny powstały w wyniku nałożenia się dwóch fal płaskich.

Założmy, że w obszarze B oświetlonym dwoma szczelinowymi źródłami światła spójnego p_1 i p_2 (rys. 1a) powstaje pole interferencyjne, wytworzone na skutek interferencji płaskich fal światła monochromatycznego, przecinających się pod kątem 2θ .



Rys. 1a



Rys. 1b

Dla fal płaskich powierzchnie stałej fazy są płaszczyznami. Na rysunku 1b przedstawiono strukturę obrazu interferencyjnego, powstałego w wyniku przecięcia się dwóch fal płaskich. Dla uproszczenia rysunku za-

znaczono na nim tylko dodatnie maksima amplitudy powierzchni falowych F_1 i F_2 , prostopadłych do powierzchni rysunku. Maksima te położone są od siebie w odległości długości fali λ . Linie przecięcia się tych powierzchni z płaszczyzną rysunku zaznaczone są liniami przerywanymi.

Dwa układy okresowo ułożonych linii przedstawiają kolejne powierzchnie falowe w każdym z ciągów falowych.

Kierunki rozchodzenia się fal 1 i 2, znajdujące się w płaszczyźnie rysunku, są normalnymi do powierzchni falowych. Linie przecięcia się płaszczyzn F_1 i F_2 są prostopadłe do płaszczyzny rysunku. Na liniach tych, których położenie zaznaczono pogrubionymi kropkami, maksima fal dodają się. Ponieważ fale rozchodzą się w kierunkach normalnych do powierzchni falowych, linie przecięcia frontów falowych przesuwają się tworząc płaszczyznę maksymalnej wypadkowej amplitudy światła, które dzielią na pół kąt między normalnymi do frontów F_1 i F_2 . Płaszczyzny te są prostopadłe do płaszczyzny rysunku i zlokalizowane tam, gdzie jest maksymalna gęstość pionowych kresek na rysunku 1b.

Uśredniony w czasie kwadrat wypadkowej amplitudy, czyli natężenie, ma swoje maksima również na tych płaszczyznach. Płaszczyzny te są miejscem geometrycznym punktów, dla których we wzorze (3) $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi n$, $n = 1, 2, 3, \dots$

Dla innych wartości różnicy faz występujących przy przemieszczaniu się punktu obserwacji wzdłuż osi y , otrzymujemy sinusoidalny rozkład natężenia w obrazie interferencyjnym. Rozkładowi temu odpowiada gęstość pionowych kresek na rysunku 1b.

Rozpatrując trójkąt zaznaczony grubą ciągłą linią łatwo zauważyć, że okres d sinusoidalnego rozkładu natężenia dany jest zależnością

$$2d \sin \Theta = \lambda. \quad (4)$$

Zauważmy, że Θ jest kątem padania utworzonym przez normalną do każdej powierzchni falowej z płaszczyznami obrazu interferencyjnego. Kiedy kąt 2Θ rośnie, okres przestrzenny d zmniejsza się.

Odległość d między dwiema ciemnymi liniami hologramu wynosi

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \Theta}. \quad (5)$$

Jak widać z wzoru 5, gęstość linii jest uzależniona od długości fali świetlnej i kąta spotkania dwóch wiązek.

2.3. Interferencja światła częściowo spójnego

Żądając nieskończenie małych rozmiarów i monochromatyczności źródła światła zapewniliśmy sobie:

a) stałość w czasie różnicy faz dla dwóch ustalonych punktów w przestrzeni, leżących wzdłuż promienia świetlnego lub, co na jedno wychodzi, to, że różnica faz mierzona w ustalonym punkcie przestrzeni na początku i na końcu ustalonego interwału czasowego Δt , nie zmienia się z czasem,

b) stałość w czasie różnicy faz dla dwóch wybranych punktów leżących w płaszczyźnie prostopadłej do promienia.

Warunek a) jest jednocześnie kryterium tzw. spójności czasowej źródła, natomiast warunek b) spójności przestrzennej.

Rzeczywiste źródła światła charakteryzują się ograniczoną spójnością zarówno czasową, jak i przestrzenną.

Wpływ częściowej spójności przejawia się głównie tym, że głębokość modulacji natężenia w obrazie interferencyjnym zmniejsza się (w składniku z cosinusem we wzorze (3) pojawia się współczynnik mniejszy od 1), wskutek czego minimalna wartość natężenia nie jest już równa 0 i prążki nie są już tak kontrastowe, jak przy interferencji światła całkowicie spójnego.

Dla ilościowej oceny spójności czasowej wprowadza się wielkość zwaną długością spójności źródła. Długość spójności l można wyrazić iloczynem $l = c \cdot \Delta t$, gdzie Δt — czas emisji ciągu falowego ze źródła, c — prędkość światła.

Długość spójności można powiązać z charakterystyką spektralną źródła następującym wzorem

$$l = \frac{c}{\Delta \nu}, \quad (6)$$

gdzie $\Delta \nu$ — jest szerokością połówkową pasma emisji na skali częstości.

Ciąg falowy o skończonej długości można przedstawić funkcją:

$$\vec{v} = \begin{cases} a_0 e^{2\pi i \nu_0 t}; & -\frac{\Delta t}{2} < t < \frac{\Delta t}{2} \\ 0 & |t| > \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

gdzie a_0 — stała,

ν_0 — częstość. Dla takich impulsów falowych zamiast zależności (3) trzeba stosować bardziej ogólną zależność:

$$I = I_1 + I_2 + \langle v_1 v_2^* + v_1^* v_2 \rangle = I_1 + I_2 + 2 \operatorname{Re} [\langle v_1 v_2^* \rangle], \quad (8)$$

gdzie nawias ostry oznacza średnią czasową.

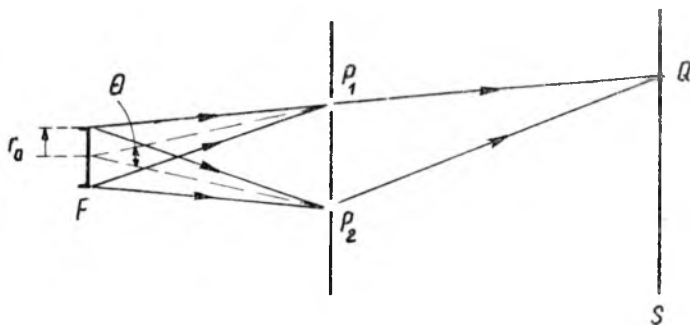
Operacja uśredniania w czasie prowadzi jedynie w przypadku nieskończonych ciągów sinusoidalnych do wzoru (3). Dla ilościowej oceny jakości obrazu interferencyjnego Michelson wprowadził wielkość zwaną widzialnością prądów V

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (9)$$

Maksymalną widzialność, równą jedności, otrzymujemy, gdy $I_1 = I_2$, co odpowiada przypadkowi całkowitej spójności. Za pomocą wzoru (8) można pokazać, że nie będą dawać obrazu interferencyjnego fale różniące się częstością ($\nu_{01} \neq \nu_{02}$) ani fale, dla których różnica faz jest przypadkową funkcją czasu. Przykładem tej ostatniej sytuacji jest interferencja fal pochodzących z dwóch różnych laserów helowo-neonowych. Uśrednioną wartość składnika interferencyjnego

$$\langle \vec{v}_1 \vec{v}_2^* + \vec{v}_1^* \vec{v}_2 \rangle = 2 \operatorname{Re} [\langle \vec{v}_1 \vec{v}_2^* \rangle] \quad (10)$$

można wyrazić przez zespolony stopień spójności γ_{12} , który ustala związek pomiędzy polami elektrycznymi w punktach P_1 i P_2 (rys. 2) i uśrednionym w czasie składnikiem interferencyjnym w punkcie Q .



Rys. 2

Ponieważ ostatnią wielkość można wyrazić przez widzialność V prążków interferencyjnych, to $\gamma_{12}(\tau)$ można powiązać z wielkością mierzalną doświadczalnie.

Niech $\vec{V}_{p1}(t)$ i $\vec{V}_{p2}(t)$ będą zespolonymi natężeniami pola elektrycznego w punktach P_1 i P_2 , a $2 \langle \vec{V}_{p1} \vec{V}_{p1}^* \rangle$ i $2 \langle \vec{V}_{p2} \vec{V}_{p2}^* \rangle$ odpowiednio natężeniami światła. Wówczas zespolony stopień spójności $\gamma_{12}(\tau)$ określa się korelacją pomiędzy $\vec{V}_{p1}(t)$ i $\vec{V}_{p2}(t)$:

$$\begin{aligned} \gamma_{12}(\tau) &= \frac{\langle \vec{v}_{p1}(t+\tau) \vec{v}_{p2}^*(t) \rangle}{[\langle \vec{v}_{p1}(t) \vec{v}_{p1}^*(t) \rangle \langle \vec{v}_{p2}(t) \vec{v}_{p2}^*(t) \rangle]^{1/2}} = \\ &= \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \vec{v}_{p1}(t+\tau) \vec{v}_{p2}^*(t) dt}{\left[\left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \vec{v}_{p1}(t) \vec{v}_{p1}^*(t) dt \right) \left(\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \vec{v}_{p2}(t) \vec{v}_{p2}^*(t) dt \right) \right]^{1/2}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Związek pomiędzy γ_{12} i $2 \operatorname{Re} [v_1 v_2^*]$ dany jest wzorem $2 \operatorname{Re} [\vec{v}_1 \vec{v}_2^*] =$
 $= 2(I_1 I_2)^{1/2} \operatorname{Re} [\gamma_{12}(\tau)] = 2(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma_{12}(\tau)| \cos \beta_{12}(\tau),$ (12)

gdzie I_1 i I_2 — są natężeniami światła przychodzącymi do punktu Q odpowiednio z P_1 i P_2 ; τ — różnica czasu przejścia światła z punktów P_1 i P_2 do Q ; β_{12} — faza wielkości $\gamma_{12}(\tau)$. Wielkość $\gamma_{12}(\tau)$ jest miarą spójności wzajemnej światła w punktach P_1 i P_2 i zawiera w sobie jako przypadki graniczne spójność czasową ($P_1 \rightarrow P_2$) i spójność przestrzenną ($\tau \rightarrow 0$, $P_1 \neq P_2$).

Możemy obecnie podstawić (12) do (8) i określić maksymalną i minimalną wartość natężenia I :

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2 |\gamma_{12}| (I_1 I_2)^{1/2} \cos \beta_{12} = 1$$

oraz

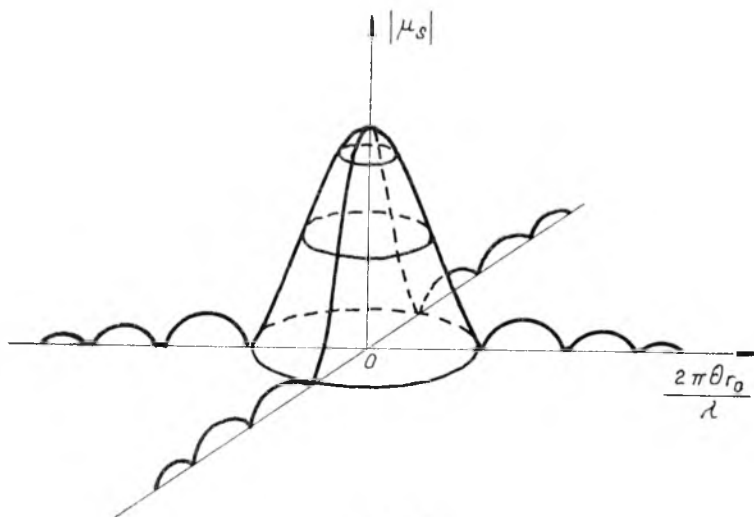
$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2 |\gamma_{12}| (I_1 I_2)^{1/2} \cos \beta_{12} = -1.$$

Podstawiając te wielkości do wzoru (9) otrzymujemy

$$V = \frac{4(I_1 I_2)^{1/2} |\gamma_{12}|}{2(I_1 + I_2)} = \frac{2 |\gamma_{12}|}{\sqrt{I_1/I_2} + \sqrt{I_2/I_1}}. \quad (13)$$

Kiedy interferujące fale mają równe natężenia, moduł stopnia spójności równy jest obserwowanej widzialności obrazu interferencyjnego.

Stopień spójności przestrzennej $\gamma_{12}(0) = \mu_s$ związany jest z poprzecznymi rozmiarami źródła światła przekształceniem Fouriera. Związek ten dla rozciągniętego źródła, zawierającego wzajemnie niespójne oscylatory, promieniujące w wąskim obszarze spektralnym podaje twierdzenie van Citter-



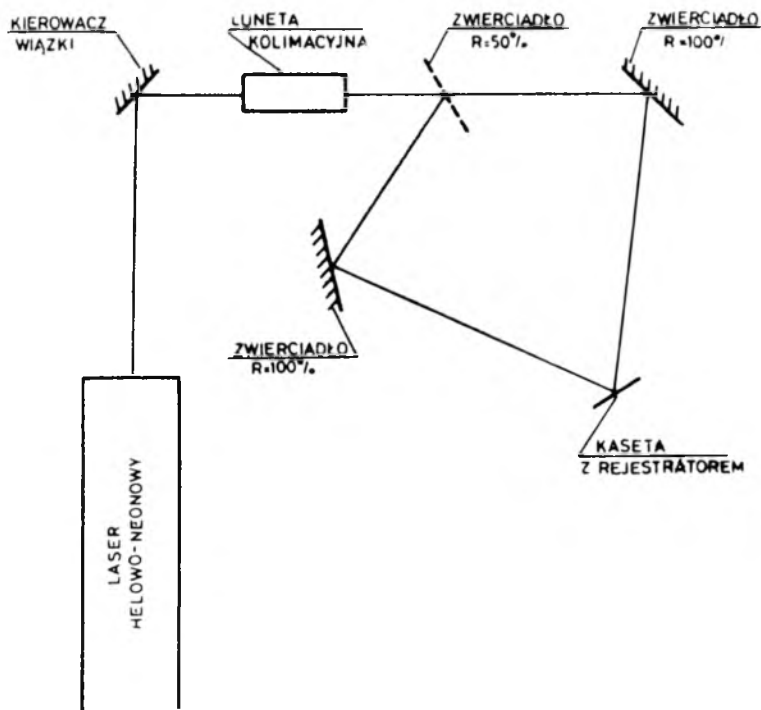
Rys. 3

ta-Zernikego: kiedy małe źródło oświetla dwa blisko położone punkty znajdujące się w dużej odległości od źródła, to stopień spójności przestrzennej zespolonych pól elektrycznych w tych punktach dany jest jako unormowany obraz fourierowski rozkładu natężenia źródła.

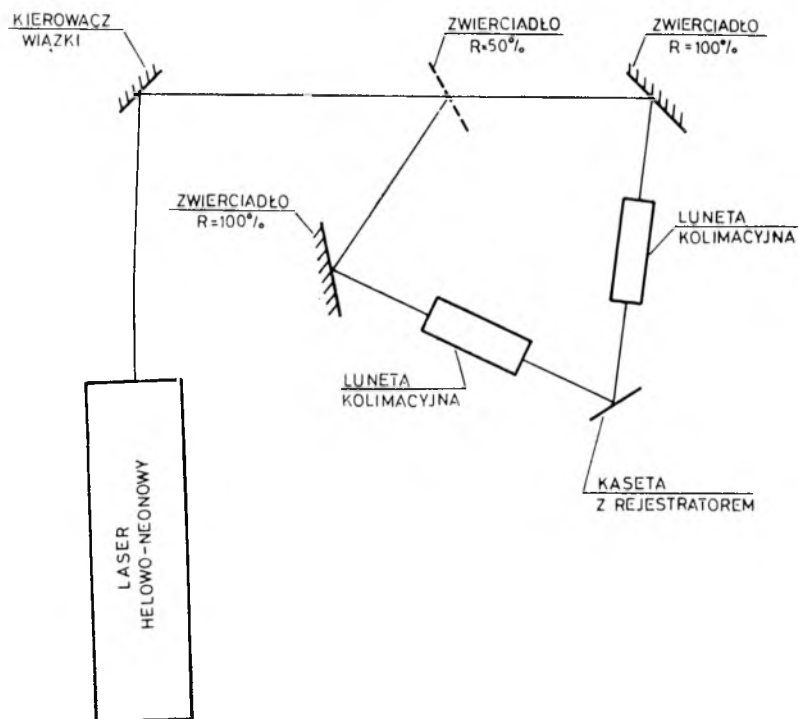
Dla jednorodnego co do jasności kołowego źródła o promieniu r_0 moduł μ_s przedstawiony jest na rysunku 3, gdzie parametry Θ i r_0 odpowiadają oznaczeniom z rysunku 2.

2.4. Opis stanowiska do otrzymywania podziałek

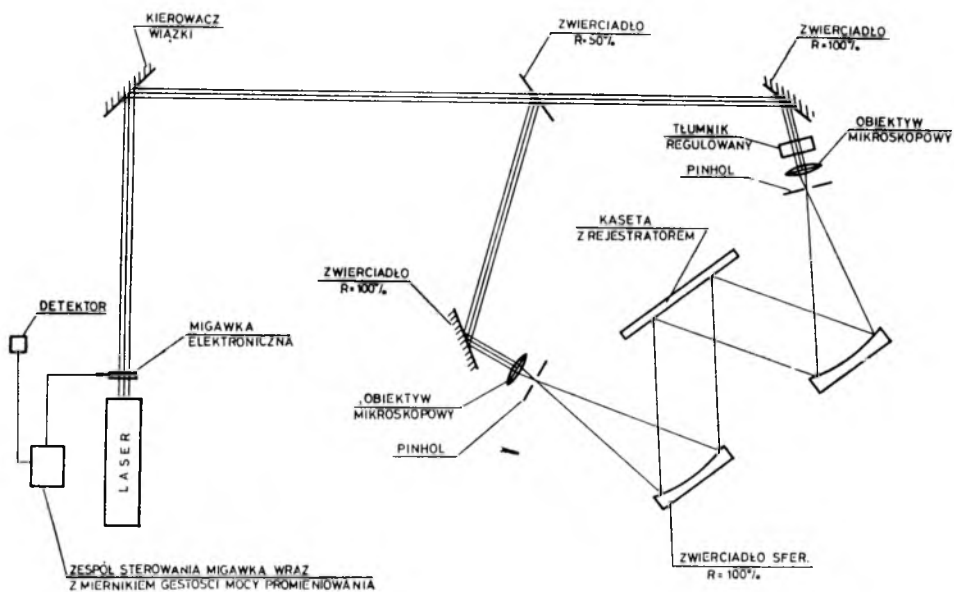
Jak to wynika z rysunku 1a, w obszarze B oświetlonym dwoma szczelinowymi źródłami światła spójnego powstaje pole interferencyjne. W szczególnym przypadku, jeśli szczeliny będą się znajdowały w nieskończoności, powstanie pole interferencyjne, składające się z prostych, jednakowo odległych od siebie linii, zgodnie z wzorem (5). Jeśli w tego typu system linii wstawimy płytkę fotograficzną z emulsją o odpowiedniej rozdzielczości, to po jej wywołaniu otrzyma się układ jednakowo odległych linii. Otrzymany system linii można wykorzystać, w zależności od obróbki płytki fo-



Rys. 4



Rys. 5



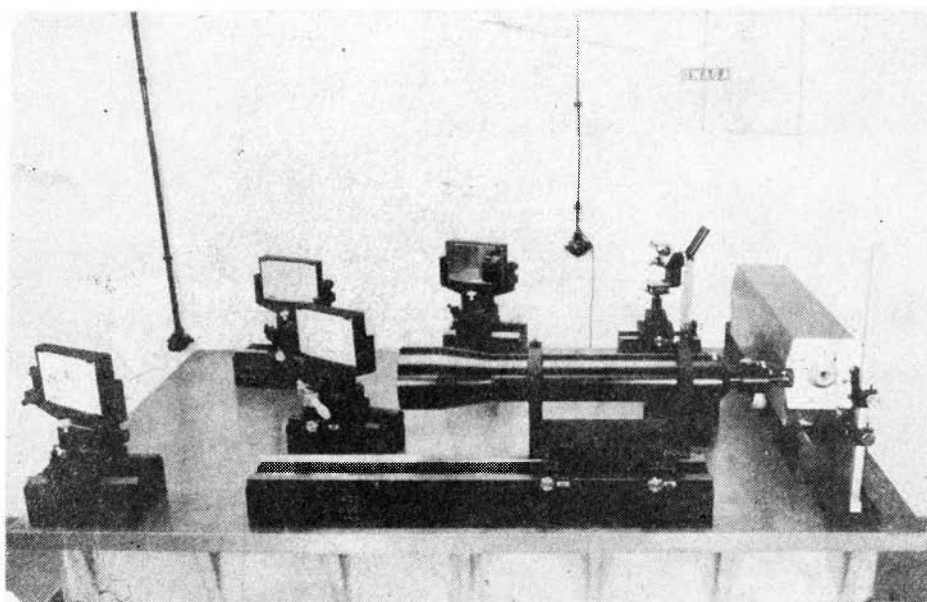
Rys. 6

tograficznej, jako siatkę dyfrakcyjną amplitudową lub fazową odbiciową lub transmisyjną.

Sz szczególnie interesujące zastosowanie dla celów wykonania podziałek mogą mieć siatki transmisyjne. Technika stosowana do wykonania siatek dyfrakcyjnych na drodze interferencji dwóch fal spójnych jest w ostatnich latach intensywnie doskonalona. Układy interferencyjne do wytwarzania siatek dyfrakcyjnych są w literaturze znane^{20,21} i przez autora zostały odpowiednio adaptowane, szczególnie pod kątem otrzymywania siatek o dokładnej ilości linii na 1 mm emulsji wysokorozdzielczej.

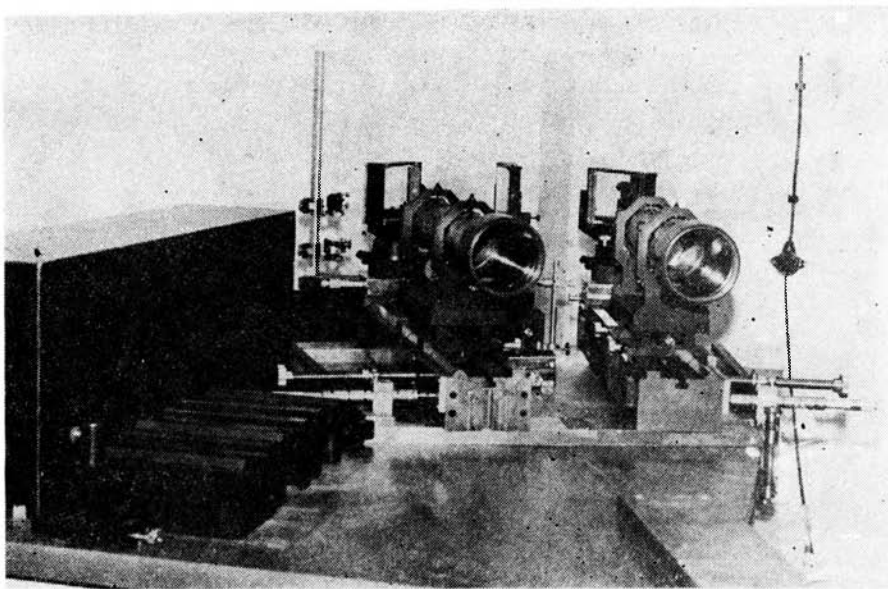
Układ optyki tych urządzeń składa się z systemu zwierciadeł w/g Lloyda lub systemu interferencyjnego Fresnela. Spójne źródła światła przedłużane są do nieskończoności poprzez soczewki lub zwierciadła.

W badaniach prowadzonych w Instytucie Geodezji i Kartografii zastosowano układy optyki przedstawione na rysunkach 4, 5, 6. Układy te zostały zrealizowane na stanowisku badawczym pokazanym na fotografiach nr 1, 2, 3.

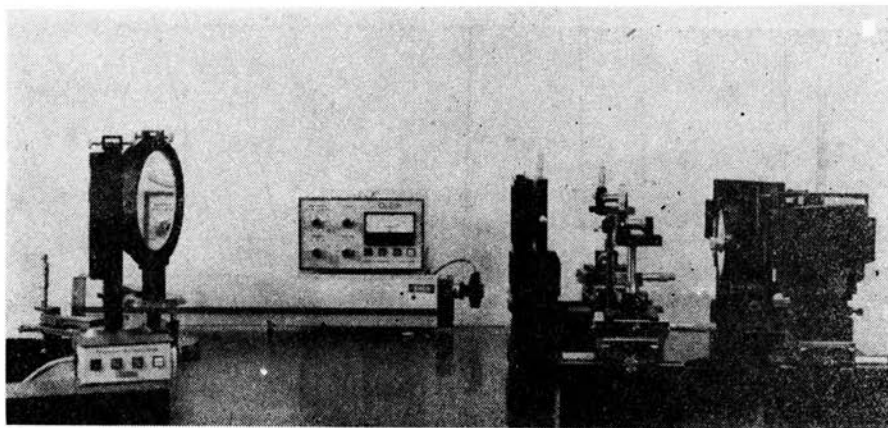


Fot. 1

- ²⁰ Interference Arrangement for produce of diffraction gratings, including a small beam splitter, and mirrors in both part-beams-Leitz 6. M.B.H., E., 29.11.58, patent niemiecki nr 1094484 z dnia 8.12.1960 r. uzyskany w USA.
- ²¹ Regle de mesure perfectionnee et procede pour sa fabrication. Patent francuski nr 2029214 z dnia 5.X.1970 uzyskany przez firmę Dr Johannssas Hendenhain z Niemieckiej Republiki Federalnej.



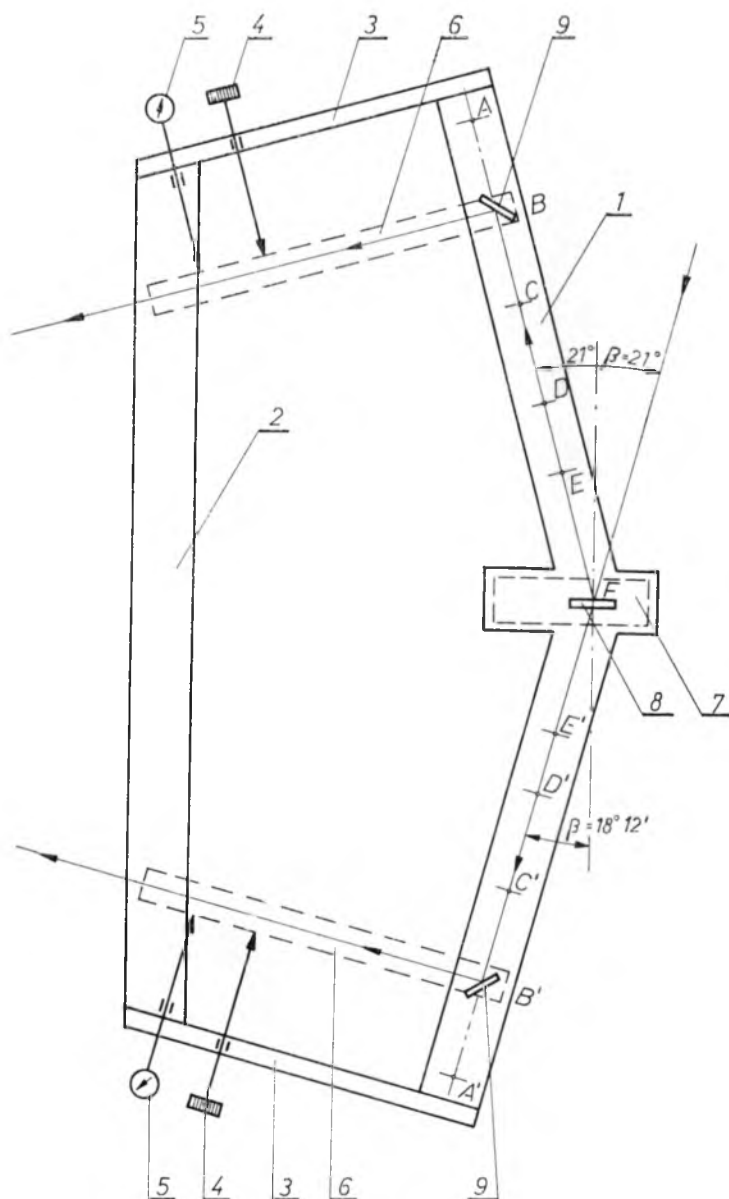
Fot. 2



Fot. 3

Eksperymenty, obserwacje i badania związane z wykonaniem podziałek holograficznych prowadzone były pod kątem ich wykorzystania do konstrukcji przetworników wielkości liniowej i wielkości skrętnej na postać cyfrową.

Pierwsze próby otrzymywania podziałek nie dały zadowalających rezultatów. Badania mikroskopowe wykazały ich małą kontrastowość, dużą ilość zaburzeń. Zastosowany układ, pokazany schematycznie na rysunku 4 oraz zrealizowany praktycznie (fot. 1), składający się z wyposażenia pro-



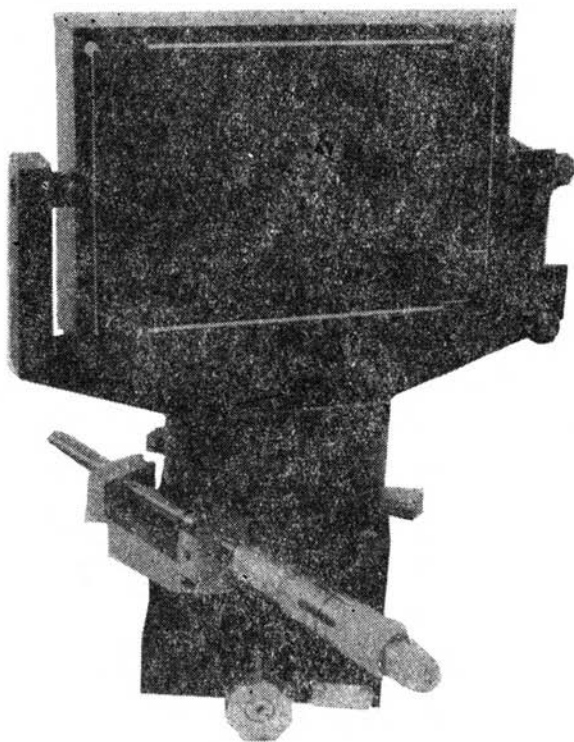
Rys. 7

dukowanego w kraju, okazał się niewystarczający dla celów otrzymywania podziałek holograficznych wysokiej jakości. Układ pokazany na rysunku 4 składał się w całości z aparatury produkowanej w Polsce zawierał:

- stół z płytą traserską, zawieszoną wg rozwiązania zaprojektowanego i wykonanego w IGiK,
- lasera He-Ne, moc 3,5 mW (WAT),
- lunety laserowej, zestaw ZHL
- lustro $R = 50\%$, nr 7012
- 2 luster o $R = 100\%$,
- kasety z materiałem światłoczułym.

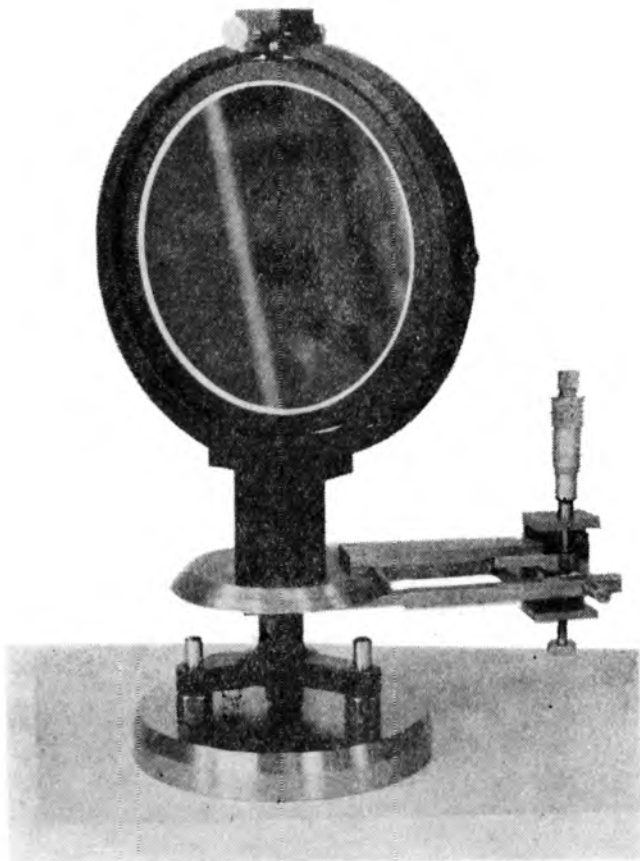
Podstawowym warunkiem, jakiemu powinna odpowiadać podziałka w postaci hologramu, jest z góry zadana gęstość. Jeśli założymy sobie jakąś wartość na d — to z przedstawionego wzoru (5) na gęstość siatki możemy obliczyć kąt Θ , pod jakim powinny się spotkać wiązki światła. Niestety konstrukcja zestawu (Zestaw Holograficzny — Laboratoryjny — ZHL produkcji PZO) nie przewiduje możliwości zrealizowania tego kąta z dokładnością większą niż kilka stopni.

Ustalono następujący tok postępowania. Po zrealizowaniu układu pomiarowego i zliczeniu linii na pierwszej wzorcowej podziałce, należy obliczyć kąt, o jaki trzeba zmienić położenie luster (rys. 4 i rys. 6). Poprawkę



Fot. 4

należy wprowadzić do nie zmienionego schematu ustawienia zestawu. Jest to możliwe dzięki skonstruowaniu dodatkowego urządzenia do luster (fot. 4 i 4a). Umożliwia ono skrócenie lustra o znaną wartość kąta.



Fot. 4a

Uzyskane podziałki okazały się niezadowalające głównie ze względu na jakość hologramów (nierównomierność gęstości optycznej). W celu poprawienia jakości, w układzie pokazanym na rysunku 4 dokonano szeregu zmian i modyfikacji i tak:

— wymieniono w posiadanym laserze He-Ne zwierciadła i rurę wyładowczą oraz zmieniono obudowę w celu uzyskania lepszej stabilności mocy i częstotliwości generowanej.

— zastosowano wersję układu interferencji z dwiema lunetami, pokazaną na rysunku 5 i fotografii 2 w celu zmniejszenia wpływu luster niskiej jakości zestawu ZHL,

— zaprojektowano i wykonano stanowisko do b. precyzyjnej zmiany kąta Θ w granicach 1 linii pokazane schematycznie na rysunku 7.

Stanowisko zostało wykonane w celu realizacji przecięcia się dwóch wiązek laserowych pod zmiennymi kątami Θ w zależności od żądanej gęstości siatki dyfrakcyjnej (rys. 7).

Wobec faktu, że lunety na swym wyjściu wykazywały zakłócające ogniskowanie rozproszonego promieniowania odbitego od wewnętrznych elementów lunety, wbudowano w nie system tłumiących kołowych diafragm.

Zmianę wartości kątów na poszczególnych otworach uzyskujemy przez obrót ław, przez pokręcenie śrub (4), a przesunięcie liniowe mierzymy za pomocą przyrządu (5), w którym jest śruba mikrometryczna pokazana na fotografii 4. Ze względu na to, że śruba mikrometryczna ma zakres pomiarowy tylko 25 mm, z tego powodu jest ona oprawiona w tuleję, na której nacięte są kanaliki umożliwiające skokowy przesuw co 25 mm w zakresie 125 mm. W tablicy 1 przedstawiono, jakie wartości kątów można otrzymać przy ustawieniu ław w otworach A, B, C, D.

Tablica 1

Otwór	Kąt Θ		Odległość od osi w mm	Ilość linii
	min	max		
A	19°50'	40°	335	544 ÷ 1080
B	9°	20°	215	247 ÷ 548
C	5°40'	10°	140	156 ÷ 275
D	4°20'	6°	105	119 ÷ 165
E	3°30'		86.5	96

2.5. Ekspozycja hologramów i ich obróbka fotochemiczna

Do rejestracji przestrzennego wzoru interferencyjnego zastosowano płyty szklane 10E75 firmy Agfa-Gevaert z emulsją typu Holotest.

Podstawowe charakterystyki tego materiału przytoczono poniżej na rysunkach 8, 9, 10.

Rozdzielczość (wg Agfa-Gevaert) — 2800 l/mm.

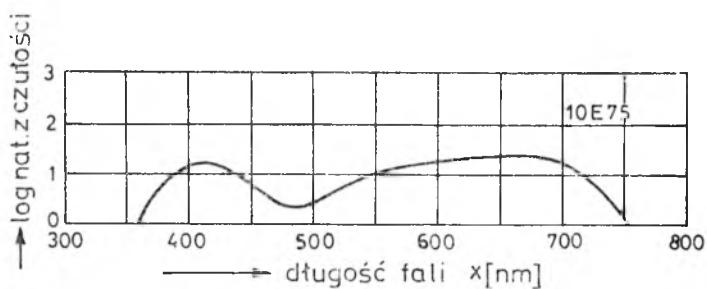
Gęstość energii konieczna do uzyskania $D = 1,0 - 20^{\text{erg/cm}^2}$ ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$).

Współczynnik kontrastu ξ — 4.

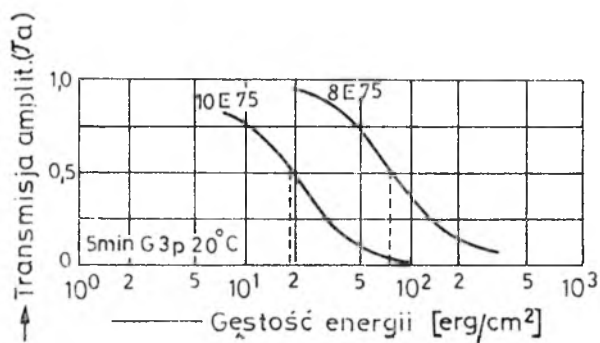
Grubość emulsji 7 μm .

Zalecany wywoływacz — G 3 P (5 min. 20°C).

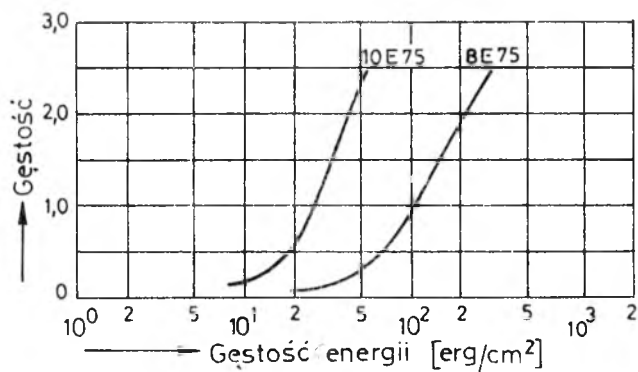
Przed dokonywaniem rejestracji prążków interferencyjnych w układzie pokazanym na rysunkach 4 i 5 od momentu włączenia lasera do mo-



Rys. 8. Wykres czułości spektralnej dla widma equi-energetycznego



Rys. 9. Krzywa transmisji amplitudowej (T_a), zdefiniowanej jako stosunek amplitud monochromatycznej płaskiej fali po i przed przejściem przez emulsję ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)



Rys. 10. Krzywa gęstości optycznej płyty w funkcji gęstości energii padającej przy stałym czasie ekspozycji ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

mentu naświetlenia płytki 10E75 oczekiwano od 4 do 8 godzin. Składały się na to czasy związane ze:

- a) stabilizacją pracy lasera,
- b) stłumienia drgań zestawu holograficznego podczas umieszczania płyty w kasecie,
- c) osiągnięciem równowagi termicznej między płytką a otoczeniem,
- d) zminimalizowaniem fluktuacji powietrza i zapylenia spowodowane go obecnością dokonującego ekspozycji.

Czasy te zostały ustalone eksperymentem przez mikroskopową obserwację zachowania się wzoru interferencyjnego.

W celu uzyskania określonego czasu ekspozycji zastosowano migawkę szczelinową aparatu fotograficznego Praktica LLC. Stosowane czasy ekspozycji:

- a) w przypadku kompletnych lunet $1/8 \div 1,5$ s.
- b) w przypadku lunet bez soczewek wyjściowych $2 \div 4$ s.

Przy rejestracji prążków interferencyjnych w układzie przedstawionym na rysunku 6 zastosowano aparaturę firmy Jodon (USA) z kaseta imercyjną i bardziej stabilnym laserem o mocy 15 mW oraz z programowaną migawką elektroniczną ustawioną w zależności od pomierzonej gęstości mocy promieniowania, co znacznie ułatwiło uzyskanie podziałek z jednoczesnym polepszeniem ich jakości.

Temperatura pomieszczenia zawierała się w granicach $18 \div 21^\circ\text{C}$.

Obróbka fotochemiczna odbywała się przy oświetleniu zalecanym przez producenta, tzn. przy lampie z filtrem G-4 (żarówka 20 W). Obróbka składała się z następujących etapów:

- a) wywoływanie,
- b) kąpiel przerywająca (2 min. 1% kwas octowy),
- c) utrwalanie (5 min, utrwalacz uniwersalny),
- d) płukanie (30 min, woda bieżąca),
- e) suszenie.

Użyto następujących wywoływaczy:

1. G 3 P (firmowy) $4 \div 8$ min, 20°C .
2. Agfa 74 (wg przepisu) $4 \div 8$ min, 20°C .
3. Wywoływacz kontrastowy Ilford wg następującego przepisu:

Na_2SO_3 bezw.	150 g,
K_2CO_3	100 g,
Hydrochrynon	50 g,
Fenidon	1,1 g,
NaOH	10,0 g,
KBr	4,0 g,
Benzotriazol	1,1 g,
H_2O dest. do obj.	1000 ml.

Wywoływacz użyto rozcieńczony w stosunku 1 : 1, czas wywołania $3 \div 8$ min, w temperaturze 20°C .

Procesy fotochemiczne wykonywano w jednolitrowym naczyniu. Podczas wywoływania poruszono płytkę ręcznie w kierunku prostopadłym do płaszczyzny z naniesioną emulsją.

2.6. Wyniki badań hologramów i ich interpretacja oraz wnioski

Eksperymenty obserwacje i badania prowadzone były w kierunkach, które wytyczone są przez wymagania stawiane podziałkom holograficznym z punktu widzenia prawidłowej pracy przetworników do pomiarów przemieszczeń liniowych i ich prezentacji w postaci cyfrowej.

Wymagania te są następujące:

1. Ścisłe zadana gęstość linii na milimetr (± 1 linia na mm).
2. Liniowość podziałki.
3. Maksymalny kontrast między liniami przezroczystymi i nieprzezroczystymi przy zachowaniu warunku minimalnego tłumienia wiązki oświetlającej (maksymalna transmisja dla zerowego rzędu dyfrakcji).
4. Jednakowa szerokość prążków przezroczystych i nieprzezroczystych.
5. Brak większych zakłóceń w strukturze zarejestrowanych prążków interferencyjnych.
6. Jednakowa grubość emulsji i jej nośnika w całym obszarze podziałki wykorzystywanej przez przetwornik.
7. Trwałość i mała wrażliwość wykonanej podziałki na odkształcenia mechaniczne i termiczne.

2.6.1. Badania gęstości linii na podziałce

Zrealizowany układ do zadawania kąta zbieżności wiązek okazał się kłopotliwy w eksploatacji z następujących względów:

1. Wymagał dużej ilości prób w celu uzyskania podziałki holograficznej o zadanej gęstości linii.

2. Na skutek niedokładności wykonania elementów zestawu holograficznego i dokonanych zmian występowała konieczność dodatkowego ustawiania przy każdej zmianie kąta zbieżności wiązek. Konieczność dodatkowego ustawiania oznaczała w tym przypadku zmianę parametrów amplitudowych i fazowych fal dwu wiązek.

Każda z prób, mających na celu uzyskanie podziałki o zadanej gęstości linii, połączona była ze zliczaniem linii za pomocą przetwornika lub mikroskopowej nasadki mikrometrycznej (MNM). Pomiary podziałek wykonane MNM traktowane były jedynie jako orientacyjne, ze względu na duże błędy powstające podczas pomiaru. Oczywiście istnieje możliwość zliczenia linii bezpośrednio na stanowisku wykonywania podziałek, bez dokony-

wania ekspozycji. Wykonanie urządzenia tego rodzaju jest problemem samym w sobie. Z powyższych doświadczeń wynika koncepcja modyfikacji dotychczasowego układu interferencji. Wydaje się być słuszne częściowe zrezygnowanie ze zmiany kąta zbieżności wiązek w celu uzyskania różnych gęstości linii, na korzyść zmiany długości fali generowanej przez laser. Zastąpienie niedokładnej zmiany kąta zbieżności znaną zmianą długości generowanej fali daje zgodnie z równaniem (5) równoważną zmianę gęstości linii podziałki. Zrealizowanie tej modyfikacji, przy ciągłym monitorowaniu generowanej długości fali oraz jej stabilizacji, pozwoli jednocześnie na wyeliminowanie wielu prób nad uzyskaniem jednej zadanej gęstości linii.

Wymagane będzie zliczenie za pomocą przetwornika liczby linii tylko jednej podziałki. Proponowanym laserem o możliwości ciągłej zmiany długości generowanej fali jest laser barwnikowy. Weryfikacja przedstawionej sugestii będzie mogła być sprawdzona eksperymentem po uzyskaniu lasera barwnikowego.

2.6.2. Liniowość podziałki

Niedokładności metody pomiarowej, jak też czynniki omówione poniżej, wynikające ze struktury zapisu podziałki, mogą wpływać na stopień liniowości rozmieszczenia prążków z powodów wymienionych poniżej:

a) czoło fali po przejściu przez układy optyczne ulega deformacji i różni się od płaskiego,

b) interferujące wiązki ulegają deformacji na niedokładnie wykonanych powierzchniach zwierciadlanych,

c) występujące fluktuacje powietrza (termiczne, zmodulowanie gęstości powietrza falami akustycznymi, spowodowane obecnością eksperymentatora) powodują miejscowe zmiany współczynnika załamania ośrodka, co jest równoznaczne z miejscową zmianą kąta zbieżności wiązek.

d) kaseta na płyty holograficzne wprowadza naprężenia do płyty szklanej (dotyczyło to eksperymentów przeprowadzonych w układzie pokazanym na rysunkach 4 i 5),

e) w czasie obróbki fotochemicznej mogą wystąpić zniekształcenia emulsji.

Wszystkie te czynniki mogą się sumować i dawać, zwłaszcza przy większej ilości linii na milimetr, znaczne odchylenia od liniowości. Wynikają stąd poniższe sugestie uwzględnione w układzie pokazanym na rysunku 6:

a) zastąpienie lunet zwierciadłami kolimacyjnymi (sferycznymi),

b) zastosowanie odbijających powierzchni o najwyższej możliwej do uzyskania w Instytucie gładkości $\sim \frac{\lambda}{10}$,

c) zastosowanie kasety imersyjnej.

Jeśli chcielibyśmy określić liniowość podziałki od strony ilościowej, to jak to wynika z rozważań nad kontrastowością linii rejestrowanego wzoru interferencyjnego dla podziałek dobrej jakości o jednakowej gęstości optycznej zgodnie z wzorem 13 nie może być zmian większych niż $\frac{\lambda}{4}$, co możemy przyjąć jako wielkość liczbowa, charakteryzującą liniowość wykonanej podziałki. Jest to wielkość dla celów inżynierskich w pełni zadowalająca.

2.6.3. Określenie maksymalnego kontrastu

Sformułowanie „maksymalny kontrast” traktowane jest tutaj jako zespół parametrów wiążących się z powtarzalnością struktury zaczernienia prążków siatki i maksymalnego zmodulowania tego zaczernienia zgodnie z wzorem (9) i (13).

Otrzymane podziałki, wykonane wg układu pokazanego na rysunkach 4 i 5, charakteryzowały się dużymi różnicami w kontraście w obrębie każdej z nich, jak i między nimi. Decydował o tym zespół parametrów, który można uzależnić, jak to wynika z podrozdziału 2.3, od:

1. Czynników wynikających z natury interferujących promieni:

a) przestrzennej modulacji natężenia promieniowania w obszarze interferencji,

b) „czystości” wiązek,

c) stabilności stanowiska i generatora interferujących fal.

2. Czynników wynikających z natury rejestratora i obróbki fotochemicznej:

a) rodzaju rejestratora,

b) czasu ekspozycji,

c) obróbki fotochemicznej.

Ad.1a. Z analizy wzoru (13) wynika, że widzialność jest określona zależnością natężeń interferujących fal oraz składową określoną przez charakter polaryzacji, interferujących wiązek, wyrażony stopniem ich spójności. W przypadku eksperymentów związanych z wykonaniem podziałek dla naszych celów oznaczać to będzie, przy warunku równych natężeń wiązek, maksymalne zmodulowanie, występujące w przestrzennym wzorze interferencyjnym. Osiągnąć to można uzupełniając dotychczasowy układ (pokazany na rysunkach 4 i 5) systemem zmiany orientacji wektora elektrycznego fal oraz systemem precyzyjnego regulowania natężeń wiązek. Wymagania te spełnia układ pokazany na rysunku 6 i fotografii 3.

Ad.1b. Pod pojęciem „czysta wiązka” rozumiemy w naszym przypadku nie zaburzoną wiązkę przedstawiającą sobą wyłącznie falę płaską.

W prowadzonych eksperymentach wg układu rysunków 4 i 5 zaistniały poważne odchylenia od przypadku idealnego. Wiązka obok podstawowej fali quasi-płaskiej miała następujące zakłócenia:

- a) promieniowanie pochodzące od rozproszeń i odbić we wnętrzu lunet,
- b) promieniowanie rozproszone powstające przy odbiciu wiązek laserowych od powierzchni zwierciadeł, a następnie od elementów układu,
- c) promieniowanie powstające na skutek rozproszenia na pyłach znajdujących się w laboratorium oraz mikrowtrąceniach występujących w elementach optycznych lunet,
- d) promieniowanie lasera typu szumowego.

Część z tych zaburzeń udało się zminimalizować wbudowując w układ optyczny lunet diafragmy kołowe, stosując nieprzezroczyste ekrany przeciwozproszeniowe oraz pinhole dokonujące filtracji przestrzennej. Wydaje się jednak, że zastosowane pinhole w układach przedstawionych na rysunkach 4 i 5 o średnicy otworu około 10 μm nie filtrują promieniowania w sposób dostateczny i konieczne jest zastosowanie mniejszych średnic otworu rzędu 1 μm (w układzie pokazanym na rysunku 6 zastosowano pinhole 3 μm).

Wylimowanie promieniowań c) stanie się możliwe dopiero po wprowadzeniu zmian proponowanych w punkcie 2.6.2. przez zastosowanie hermetyzacji stanowiska i wprowadzenie systemu odpylającego (podjęto budowę takiego stanowiska).

Ad. 1c. Stanowisko do wykonywania podziałek wykazało dość dobrą stabilność mechaniczną, jednak tylko przy spełnieniu określonych warunków, nie zawsze zależnych od wykonującego eksperyment.

Szczególnie wrażliwa na hałas okazała się płyta holograficzna, ponieważ z racji wprowadzanych naprężeń usunięto jej wszystkie mocowania do kasety. Płyta wprowadzona w drgania falami akustycznymi zmieniała swe położenie w stosunku do nieruchomej struktury interferencyjnej. Rezultatem tego było rozmycie prążków równoznaczne spadkowi kontrastu między zarejestrowanymi liniami. Przy większym poziomie hałasu oraz zbyt krótkim czasie oczekiwania na mechaniczne ustabilizowanie się stanowiska następował efekt przemieszczania się wzoru interferencyjnego w przestrzeni, w czasie ekspozycji. W tym przypadku mamy do czynienia z interferencją dwóch monochromatycznych fal o bliskiej częstotliwości ν_1, ν_2 . Pojawienie się dwóch częstotliwości jest wynikiem wibracji, deformacji zwierciadeł (efekt Dopplera). Interferencyjna struktura przemieszcza się w przestrzeni przechodząc drogę równą odległości między sąsiednimi maksimami w czasie:

$$\tau = \frac{1}{\Delta\nu}, \quad (14)$$

gdzie

$$\Delta v = v_1 - v_2.$$

A zatem czas ekspozycji powinien być jak najkrótszy.

Przykładowo: dla czasu $\tau = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{\Delta v}$ w czasie rejestracji zaistnieje zmiana różnicy faz o $\pi/2$, co zmniejszy kontrast.

Wyrażenie (14) określa jednocześnie czasową zdolność rozdzielczą rejestratora dla zarejestrowania struktury pola interferujących wiązek o różnej częstotliwości. Droga umożliwiającą zminimalizowanie powyższego zjawiska jest spełnienie następujących wymagań:

a) zastosowanie długich czasów oczekiwania na ustalenie się warunków równowagi,

b) akustyczna izolacja stanowiska,

c) skrócenie czasów ekspozycji przez zastosowanie lasera większej mocy oraz użycie emulsji maksymalnie „szybkich” (o wysokiej czułości).

Materiały wysokoczułe mimo swej dużej czasowej rozdzielczości mają jednak niską zdolność rozdzielczą przestrzenną. A zatem kwestia ich użycia jest zależna od konkretnych warunków.

Ad. 2. W prowadzonych doświadczeniach jako rejestratora przestrzennego wzoru interferencyjnego użyto materiału firmy Agfa-Gevaert typu 10E75 bez warstwy przeciwodblaskowej o parametrach i charakterystykach przedstawionych na początku podrozdziału. Materiał ten wykazywał bardzo zróżnicowany kontrast między liniami tak w obrębie konkretnej siatki, jak i między różnymi siatkami, było to związane tak z czynnikami opisanymi wcześniej, jak i z charakterem materiału rejestrującego, czasem jego ekspozycji oraz obróbką fotochemiczną.

Przyjmuje się zwykle, że amplitudowy współczynnik przepuszczania τ_a wywołanej płyty holograficznej jest proporcjonalny do naświetlenia E emulsji.

Wykresem funkcji $\tau_a = f(E)$ jest linia prosta, jeżeli

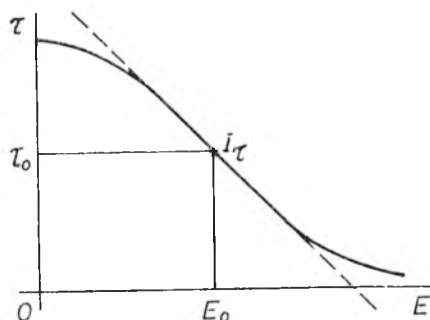
$$\tau_a = \tau_0 + \tau_1 (E - E_0), \quad (15)$$

gdzie E_0 , τ_0 , τ_1 są parametrami stałymi.

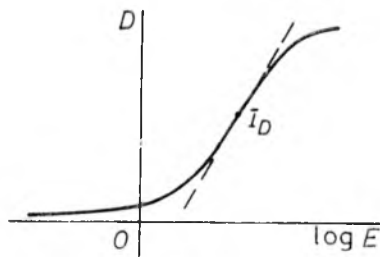
W rzeczywistości τ_a nie zmienia się liniowo wraz z E i ma charakter jak na rysunku 11.

Na rysunku 12 przedstawiono krzywą charakterystyczną emulsji, opisującą zależność między gęstością optyczną D a logarytmem naświetlenia (czas ekspozycji stały).

W przypadku wykonywania podziałek, zmiany $\Delta E = E - E_0$ wokół wartości E_0 są duże, co równa się znacznym odstępstwom od zależności liniowej. Wobec tego krzywą rzeczywistą można aproksymować za pomocą



Rys. 11. Amplitudowy współczynnik przepuszczania wywołanej płyty holograficznej w funkcji natężenia oświetlenia na płycie (stały czas ekspozycji)



Rys. 12

równania w postaci rozwiniętej w szereg Taylora w sąsiedztwie punktu przegięcia I_τ :

$$I_\tau = \tau_0 + \Delta E \frac{d}{dE} + \frac{E^3}{3!} \frac{d^3}{dE^3} + \dots \quad (16)$$

Wprowadźmy pojęcie współczynnika kontrastowości ξ emulsji (przy założeniu, że czas ekspozycji jest ten sam w każdym punkcie hologramu)

$$\xi = \frac{dD}{dH} = -2 \frac{E}{\tau_0} \frac{d}{dE}, \quad (17)$$

gdzie E zgodnie z wzorem 3 wynosi $E = I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$.

W eksperymentach wykonywanych w układzie jak na rysunku 5 wiązki laserowe poszerzone do średnicy około 10 cm, wykazywały duże zróżnicowanie w energii wzdłuż ich promienia zgodnie z rozkładem Gaussa, mimo że zastosowanie zespołu filtracji przestrzennej znacznie poprawia ten rozkład na bardziej jednorodny. Wobec takich warunków eksperymentu i przeprowadzonych wyżej rozważań staje się oczywiste zróżnicowanie ξ w różnych miejscach powierzchni wykonywanych siatek.

W doświadczeniu dokonany za pomocą lunet pozbawionych zespołu soczewek wyjściowych mieliśmy do czynienia z wiązką rozszerzoną w punkcie umieszczenia kasety do średnicy około 60 cm i rozkład energii powierzchni płyty holograficznej był znacznie bardziej równomierny, co natychmiast poprawiło jednorodność struktury zaczernienia emulsji.

Reasumując, wydaje się celowym uwzględnienie wszystkich warunków dla otrzymania właściwego kontrastu, które można przedstawić następująco:

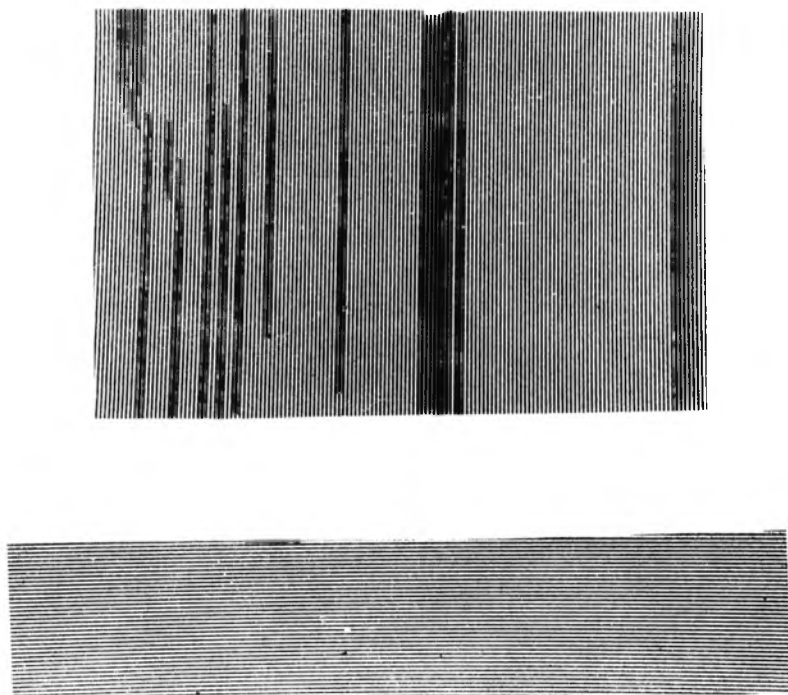
1. Maksymalne zmodulowanie przestrzennej struktury interferencyjnej.
2. Maksymalna „czystość” wiązek.
3. Zapewnienie stabilności stanowiska i częstotliwości lasera.
4. Wyrównanie rozkładu energii w przekrojach poprzecznych interferujących wiązek (przez zastosowanie poszerzenia wiązek, absorbcyjnych filtrów Grussa, dużych powiększeń obiektywów mikroskopowych i małych średnic pinholi w zespołach filtracji przestrzennej).
5. Znajomość dokładnych charakterystyk materiałów rejestrujących.
6. Znajomość gęstości energii promieniowania (przez zastosowanie odpowiednich mierników).
7. Możliwość precyzyjnego operowania czasami ekspozycji (przez zastosowanie migawki sterowanej elektronicznie).
8. Dobór odpowiednich materiałów rejestrujących.

Nawiązując do punktu 8 z aktualnie dostępnych na rynkach światowych najlepsze materiały holograficzne przedstawia firma Kodak oferując materiał High Resolution Plate HRP o $\xi = 8$ dla 10E75 Agfa-Gevaert $\xi = 4$. Materiał ten, jak i inny równie interesujący, typu 649F, wymaga zastosowania laserów generujących w zakresie widma od ok. 4500 Å do ok. 5500 Å, tzn. laserów HeCd, Ar, Nd: YAG, barwnikowych, co jest zgodne z podanymi wcześniej sugestiami.

2.6.4. Zaburzenia wiązek

Wykonane podziałki posiadały liczne zaburzenia w strukturze prążków. Większość tych zaburzeń to wynik wzajemnej superpozycji fal:

- a) płaskich,
- b) kulistych z rozproszczeniami na pyłach w atmosferze, na powierzchni płyty holograficznej i na pęcherzach soczewek lunet,
- c) promieniowania rozproszonego na elementach układu. Inne zaburzenia pojawiły się na skutek wad emulsji 10E75. Na rysunku 13 przedstawiono w powiększeniu 100× podziałkę o gęstości 250 l/mm.



Rys. 13

2.6.5. Grubość emulsji

Wahania grubości płyty szklanej wraz z emulsją wynosiły ok. $\pm 10 \mu\text{m}$, co skomplikowało prace związane ze zliczaniem linii podziałki.

2.6.6. Odporność emulsji na działania mechaniczne

Emulsja 10E75 jest bardzo wrażliwa na uszkodzenia mechaniczne tak w czasie obróbki fotochemicznej, jak i w czasie eksploatacji przetwornika.

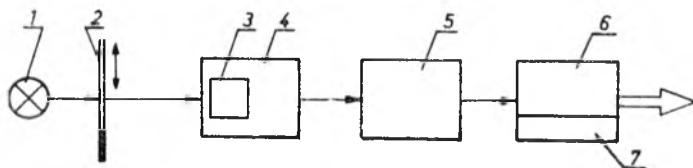
Również ze względu na małą grubość nośnika szklanego podziałki ($1,2 \div 1,4 \text{ mm}$) okazały się wrażliwe na naprężenia spowodowane mocowaniem przetwornika na stoliku. Wpływ rozszerzalności cieplnej niezauważony przy gęstości linii rzędu 250 l/mm może okazać się znaczący przy wyższych gęstościach. Wpływ ten został wyeliminowany z chwilą użycia kaset imersyjnych w układzie wg rysunku 6. Zamówiono też płyty grube (około 6 mm) o dużej płaskości $\pm 1 \mu\text{m}$.

3. Holograficzny Konwerter liniowy (HKL)

3.1. Zasada działania i pomiaru HKL

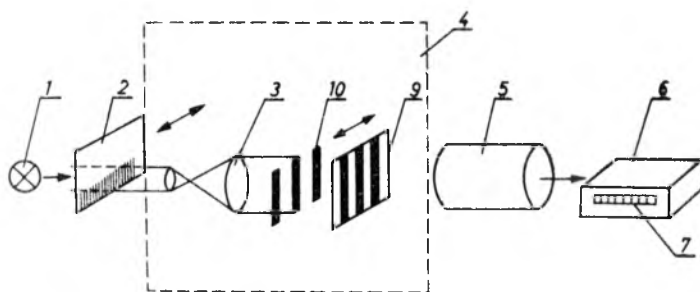
Zasada działania HKL została zawarta w zgłoszeniu patentowym nr P-176959²². Schemat blokowy tego urządzenia przedstawia rysunek 14.

Według oznaczeń rysunku 14, schemat blokowy składa się ze źródła promieniowania (1), które oświetla holograficzną podziałkę (2) o dużej gęstości prążków, generatora impulsów świetlnych (4), zawierającego układ optyczny, wyróżniający prążki zerowego rzędu dyfrakcji podziałki holograficznej z detektora (5), z zespołu (6) do zliczania impulsów elektrycznych oraz ze wskaźnika (7) do cyfrowego przedstawienia wyniku.



Rys. 14

Na rysunku 15 przedstawiono ogólny schemat holograficznego konwertera liniowego.



Rys. 15

Układ optyczny (3) służy do uzyskania na powierzchni przysłony prążkowej (9) powiększonego obrazu prążków zerowego rzędu dyfrakcji podziałki holograficznej. Podziałka holograficzna jest przy tym umieszczona w ten sposób, że jej linie całkowicie wypełniają pole transmisji układu optycznego (3). Generator impulsów świetlnych (4) jest wyposażony

²² Zgłoszenie patentowe PRL nr zgł. P. 176959 z dnia 30. XII. 1974 r. Henryk Z. Kowalski, Adam Dubik, Paweł Osiennik, Franciszek Król (zgłoszono ponadto w ZSRR, Szwecji, Szwajcarii, RFN, Kanadzie, Francji, Japonii, USA).

w przesłone prążkową (9), która stanowi zarejestrowany fotograficznie powiększony obraz prążków zerowego rzędu dyfrakcji tej podziałki.

Detektor (5) jest detektorem fotoelektrycznym, który przekształca impulsy świetlne, padające na jego powierzchnię czynną, na odpowiednie impulsy elektryczne.

Zespół zliczający (6) służy do zliczania podawanych na jego wejściu sygnałów elektrycznych, które jako ostateczny wynik pomiarów przedstawiane są w postaci cyfrowej na wskaźniku 7. Działanie urządzenia jest następujące:

Element, którego wyznacza się wielkość przemieszczenia, jest sprzężony z podziałką (2), co powoduje odpowiednie przesuwanie się podziałki względem układu optycznego (3) i przesłony prążkowej (9).

Ponieważ linie podziałki holograficznej (2) całkowicie wypełniają pole transmisji układu optycznego (3), impulsy świetlne są generowane w wyniku równoczesnego przesłonięcia wielu przestrzeni międzyprążkowych przesłony prążkowej (9) przez przesuwające się względem nich prążki powiększonego obrazu podziałki holograficznej wskutek czego stanowią one sumaryczną wartość sygnału świetlnego padającego na detektor (5), a tym samym umożliwiają uzyskanie dużej niezawodności.

3.2. Praktyczna realizacja kolejnych modeli HKL

Kolejne modele HKL powstawały w wyniku zdobytych doświadczeń, głównie przez zmianę rozwiązań generatorów impulsów świetlnych. Ze względu na funkcjonalność, przetwornik HKL składa się z trzech zasadniczych zespołów:

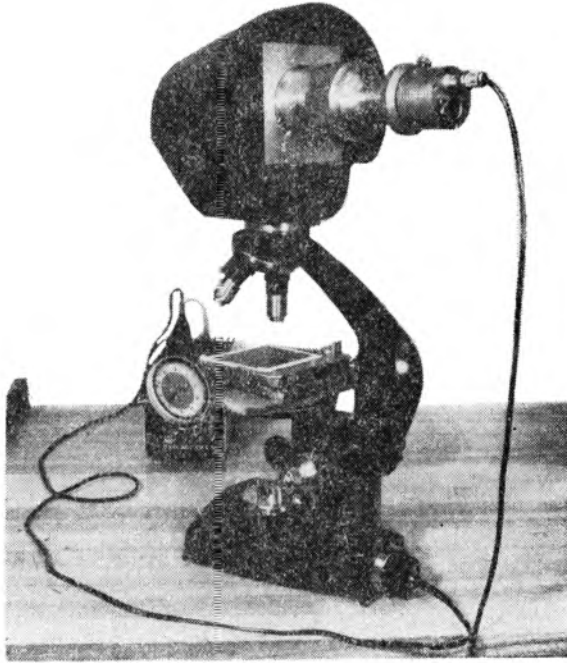
- zespołu mechaniczno-optycznego,
- zespołu elektroniki (zasilanie, wzmacnianie i kształtowanie impulsu),
- zespołu licznika wraz z wyświetlaczem wyniku.

Pierwszy model nazwany HKL-1 został zrealizowany przez zaadaptowanie mikroskopu MB-30 z nasadką projekcyjną produkcji PZO i miał jeden kanał informacyjny. Nie pozwalało to na wyróżnienie kierunku pomiaru oraz czyniło HKL-1 bardzo wrażliwym na wpływy zewnętrzne (wstrząsy). Budowa HKL-1 miała na celu sprawdzenie rozwiązania ideowego zgłoszonego do Urzędu Patentowego i zdobycie doświadczeń konstrukcyjnych w budowie przyrządu o dużej precyzji pomiaru.

Fotografia 5 przedstawia praktyczną realizację modelu HKL-1.

Chcąc się uniezależnić od wstrząsów i zwiększyć zakres pomiarowy w HKL-1 zastosowano w modelu HKL-2 system detekcji i zliczania z wyróżnieniem kierunku przemieszczeń hologramu, czyli tzw. zliczanie rewer-

syjne. Wiąże się to z wprowadzeniem systemu generatora impulsów świetlnych z dwoma symetrycznymi kanałami informacyjnymi w przeciwieństwie do pojedynczego kanału, jak to powiedziano przy HKL-1.



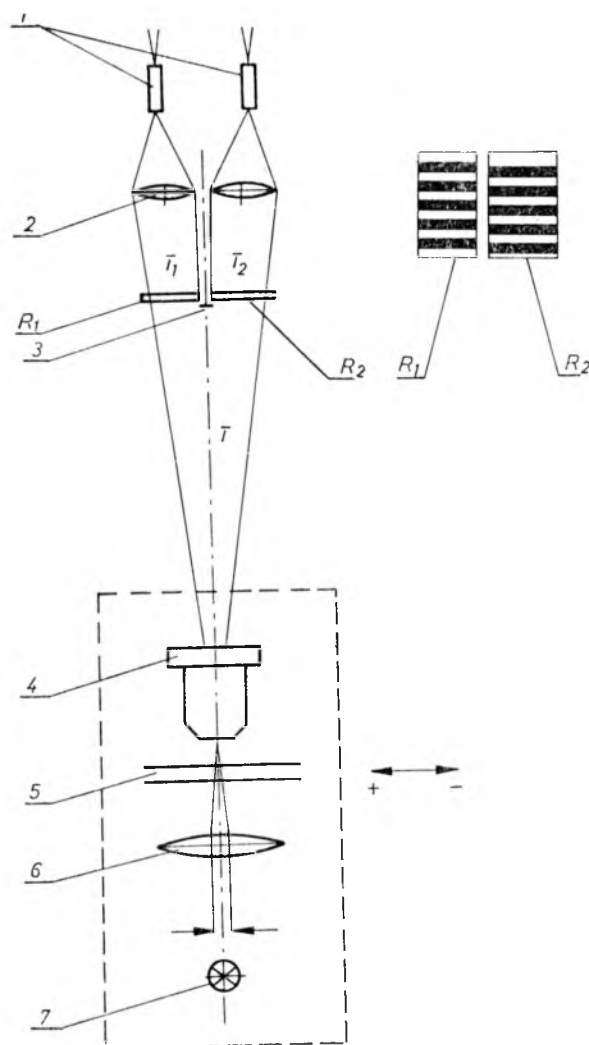
Fot. 5

Rozwiązanie opisane wyżej zastosowano w modelu HKL-2, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 16 gdzie oznaczono:

- 1 — fotodetektory,
- 2 — soczewki skupiające,
- 3 — przesłona rozdzielająca,
- 4 — obiektyw mikroskopowy,
- 5 — podziałka holograficzna,
- 6 — kondensor,
- 7 — oświetlacz,
- R_1, R_2 — przysłony prążkowe (ekrany),
- T, T_1, T_2 — kanały optyczne.

Praktyczną realizację modelu HKL-2 wraz z urządzeniami towarzyszącymi przedstawiono na fotografii 6 oznaczając:

- 1 — mikroskop,
- 2 — zwierciadło wklęsłe,
- 3 — zasilacz oświetlacza halogenowego,



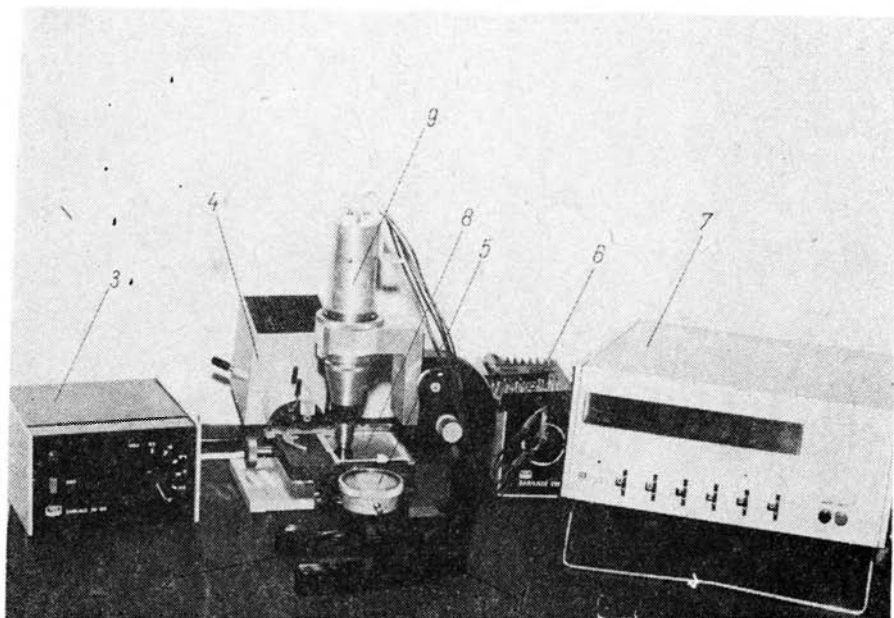
Rys. 16

- 4 — oświetlacz halogenowy,
- 5 — czujnik zegarowy,
- 6 — układ elektroniczny,
- 7 — licznik rewersyjny,
- 8 — podziałka holograficzna,
- 9 — korpus przetwornika z wmontowanymi ekranami oraz obiektywem mikroskopowym.

Model HKL-2 zmontowany był na korpusie mikroskopu MB-30. Stosowano oświetlenie zewnętrzne (oświetlacz halogenowy $U_z = 12\text{ V}$, wiązka

oświetlająca równoległą, przesłony oświetlacza i mikroskopu otwarte, żarówka 20 W, $U_z = 6$ V, $I_z = 3,3$ A).

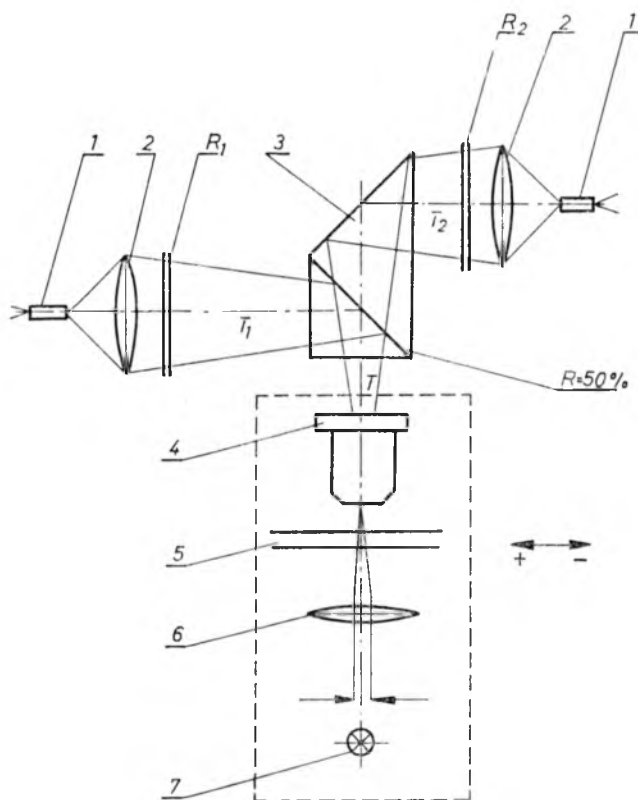
Stosowano obiektywy mikroskopowe o powiększeniach $20\times$, $40\times$, $100\times$ (PZO), $45\times$ Reichert). Wykorzystywano układ elektroniczny detekcji, wzmacniania i przetwarzania generowanych sygnałów świetlnych opisany w dalszej części pracy.



Fot. 6

Dokonano za pomocą modelu HKL-2 oraz czujnika zegarowego pomiarów gęstości linii grupy siatek o gęstościach linii zbliżonych do 100 l/mm oraz 250 l/mm, otrzymując 400 lub 1000 impulsów na mm. Celem konstrukcji modelu HKL-2 było oprócz uzyskanej rewersyjności zliczania (określenia kierunku zliczania podziałki) zoptymalizowanie oświetlenia zewnętrznego lub wewnętrznego tak ze względu na parametry zasilania, jak i wpływy termiczne. Stwierdzono iż w następnych modelach konwertera może być zastosowane oświetlenie „zimne” (dioda luminescencyjna).

W celu optymalizacji konstrukcji, a w szczególności jej miniaturyzacji, przystąpiono do budowy modelu HKL-3, w którym jeden strumień świetlny podzielono pryzmatem półprzepuszczalnym na dwa kanały zakończone dwoma przysłonami prążkowymi przesuniętymi w fazie w celu uzyskania zliczania rewersyjnego.



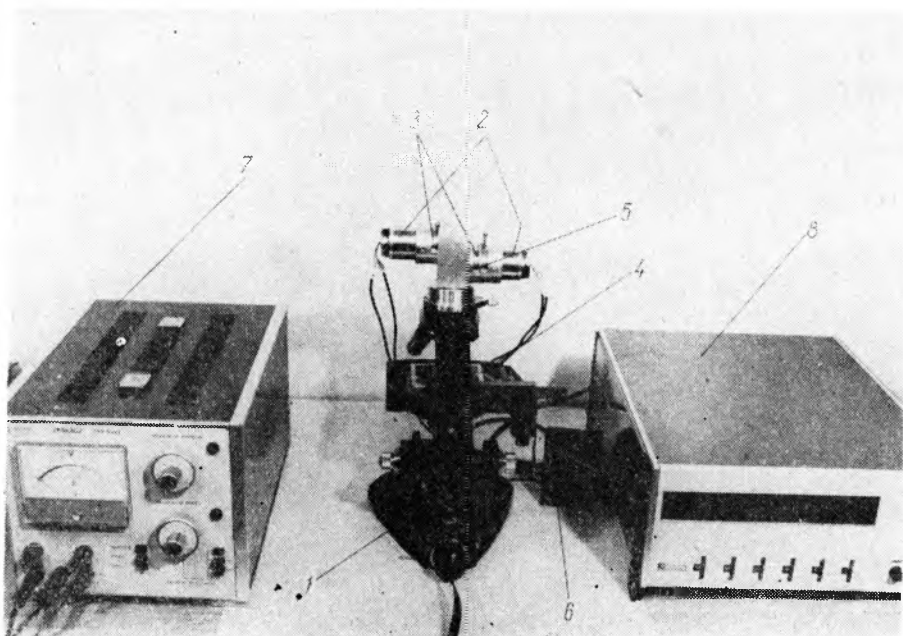
Rys. 17

Model HKL-3 zrealizowano w oparciu o schemat przedstawiony na rysunku 17 z możliwością regulacji przesunięcia fazowego ekranów R_1 i R_2 . Na rysunku oznaczono:

- 1 — fotodetektory,
- 2 — soczewki skupiające,
- 3 — pryzmat półprzepuszczający,
- 4 — obiektyw mikroskopowy,
- 5 — podziałka holograficzna,
- 6 — kondensor,
- 7 — oświetlacz,
- R_1, R_2 — przysłony (ekrany),
- T, T_1, T_2 — torry optyczne.

Praktyczną realizację modelu HKL-3 wraz z urządzeniami towarzyszącymi przedstawiono na fotografii 7 z oznaczeniami:

- 1 — mikroskop MB-30 z oświetlaczem wewnętrznym,



Fot. 7

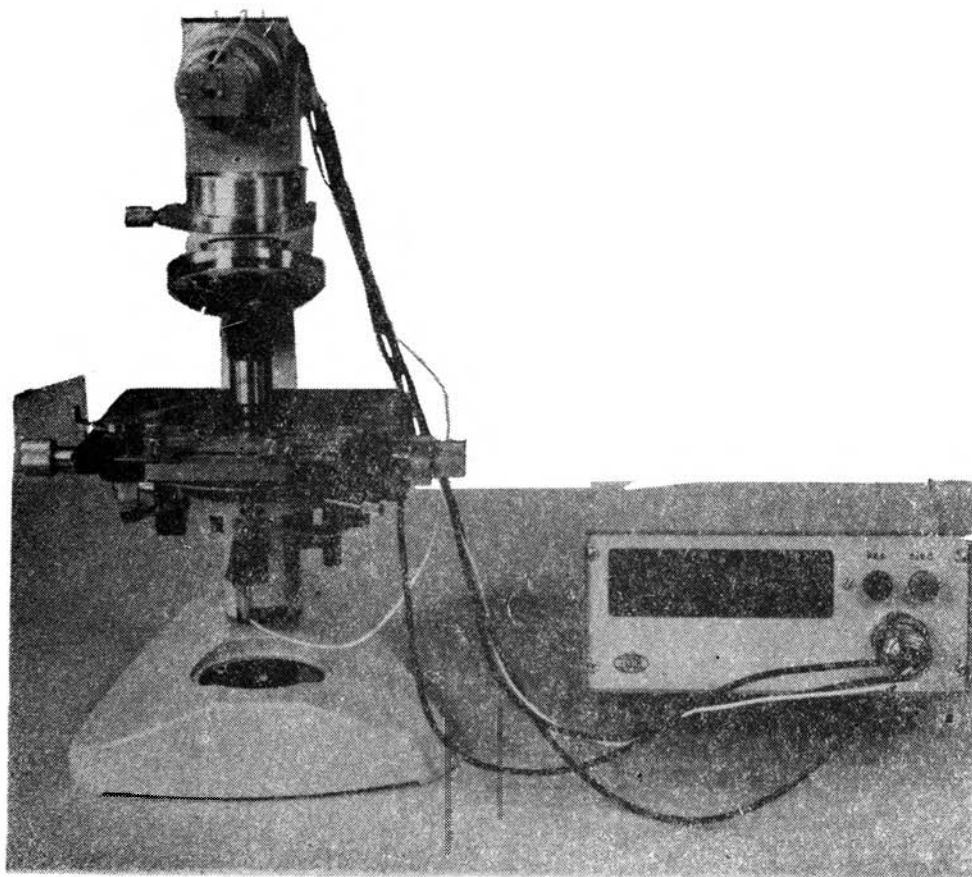
- 2 — generator impulsów świetlnych zawierający soczewki skupiające oraz fotodetektory,
- 3 — oprawki ekranów,
- 4 — podziałka holograficzna,
- 5 — śruba regulacji przesunięcia fazowego między ekranami,
- 6 — układ elektroniczny,
- 7 — zasilacz typ 5351 do oświetlacza mikroskopu,
- 8 — licznik rewersyjny.

Kolejny model HKL-4 zrealizowano również w oparciu o schemat przedstawiony na rysunku 17 wykorzystując doświadczenia z poprzednich trzech modeli. W rezultacie uzyskano miniaturyzację licznika oraz zmiany oświetlacza (dioda luminescencyjna).

Praktyczną realizację modelu HKL-4 wraz z urządzeniami towarzyszącymi pokazano na fotografii 8.

3.3. Technologia wykonywanych ekranów do HKL

Technologia wykonywanych ekranów do różnych modeli przetworników zbudowanych w IGIK była podyktowana założeniem, że ekran jest powiększonym obrazem podziałki holograficznej przy czym powiększenie to wynika z zastosowanego układu optycznego przetwornika. Dlatego ekrany wykonano sposobem fotograficznym na stanowisku złożonym z mikrosko-



Fot. 8

pu MB-30 (bez tubusa), pierścienia pośredniczącego, aparatu fotograficznego Praktica LLC (bez obiektywu) oraz oświetlacza.

Z punktu widzenia prawidłowej pracy przetwornika istotne są wymagania jakie powinny spełniać ekrany. Wymienić tu należy:

1. Wierność zarejestrowanego obrazu prążków (w sensie geometrycznym) w stosunku do samego obrazu.
2. Kontrast między liniami, co najmniej taki, jak na podziałce.
3. Minimalne tłumienie sygnału świetlnego.
4. Niewrażliwość na odkształcenia.
5. Brak uszkodzenia emulsji.

Zagadnienie wymienione w punkcie 1 rozpatrywane w aspekcie idealnego odwzorowania szerokości prążków jest połączone z problemem reakcji nieliniowej materiału rejestrującego na niejednorodne oświetlenie

i opisane w rozważaniach nad technologią otrzymywania siatek dyfrakcyjnych.

Szkodliwe tłumienie wprowadzane do toru świetlnego przetwornika przez ekrany przy spełnieniu warunków 1 i 2 zależy wyłącznie od przezroczystości emulsji oraz jej nośnika. W tablicy 2 przedstawiono zastosowane materiały, obróbkę fotochemiczną oraz realizację wymagań 1, 2, 3, 4.

Tablica 2

Lp.	Rodzaj materiału	Wywoływacz	Realizacja			
		5 min, 20°C	1	2	3	4
1.	Mikrofilm pozytywowy FOTON	uniwersalny	—	—	—	—
		Agfa-74	—	—	—	—
		Ilford	—	—	—	—
		Repro	—	—	—	—
2.	F0-6 ORWO	uniwersalny	—	—	—	—
		Agfa-74	—/+	—/+	—	—
		Ilford	—/+	—/+	—	—
		Repro	—/+	—/+	—	—
3.	HDU-lp. Agfa-Gevaert	uniwersalny	—	—	—	—
		Agfa-74	+	+	+	—
		Ilford	+	+	+	—
		Repro	—/+	—/+	—/+	—
4.	10E75 Holotest Agfa-Gevaert	uniwersalny	—	—	—	+
		Agfa-74	+	+	+	+
		Ilford	+	+	+	+
		Repro	—/+	—/+	—/+	+
		G-3p	+	+	+	+

Płukanie po wywoływaniu 30 s, po utrwaleniu 30 min, czas utrwalania 5 min (utrwalacz uniwersalny).

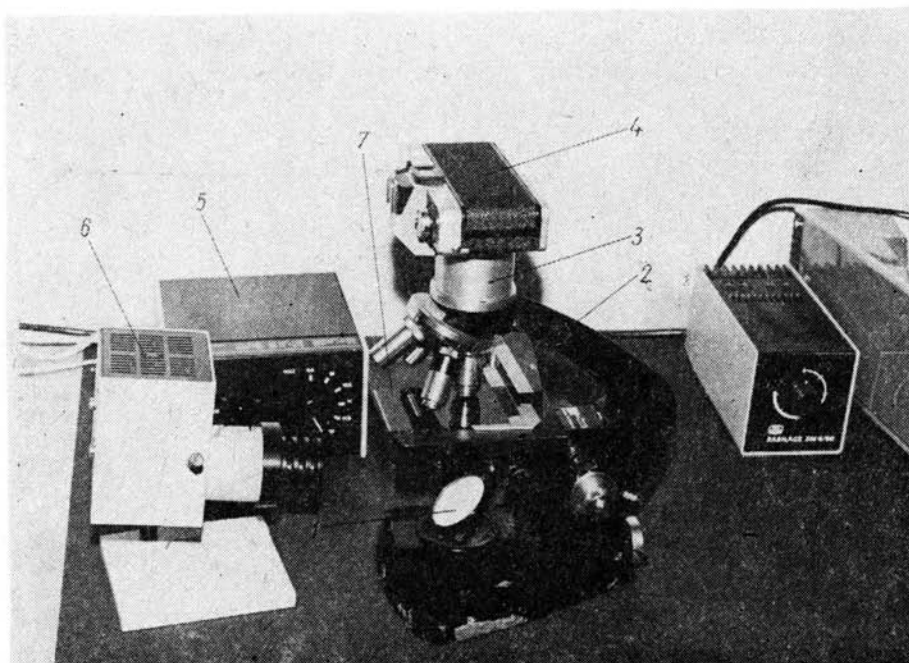
Kąpiel zwilżająca Filpon 30 s.

Fotografie siatek 250 l/mm, obiektywy PZO 40×, 60×, 100×, Richert 45×.

Sposób zmontowania poszczególnych elementów, w wersji z oświetlaczem zewnętrznym, przedstawiono na fotografii 9 gdzie oznaczono:

- 1 — zwierciadło płaskie,
- 2 — mikroskop MB-30,
- 3 — pierścień pośredniczący,
- 4 — aparat fotograficzny,
- 5 — zasilacz oświetlacza halogenowego,
- 6 — oświetlacz halogenowy,
- 7 — podziałka holograficzna.

Długość pierścienia pośredniczącego była dobierana w zależności od tego, do którego modelu przetwornika miał być zastosowany ekran. Ustawienie ostrości przy wykonywaniu zdjęcia odbywało się dwiema metodami. Przy dużych powiększeniach obiektywów mikroskopowych rzędu $100\times$ skuteczna była bezpośrednia obserwacja prążków na matówce sporządzonej z astralonu i umieszczonej w płaszczyźnie ekspozycji. Przy powiększeniach mniejszych rzędu $20\times$ stosowano obserwacje prążków przez zaadoptowaną lupę o powiększeniu $10\times$.

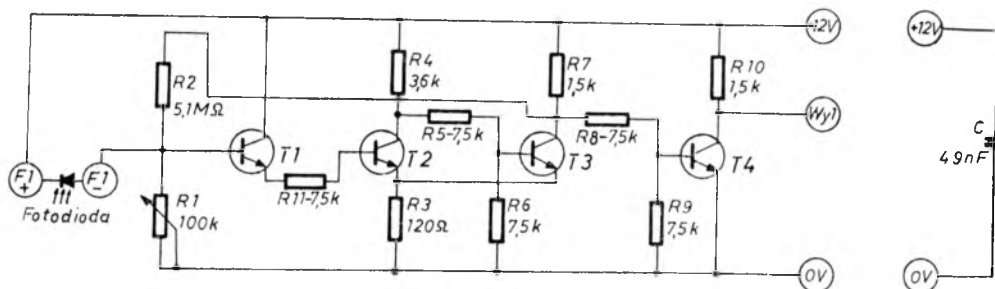


Fot. 9

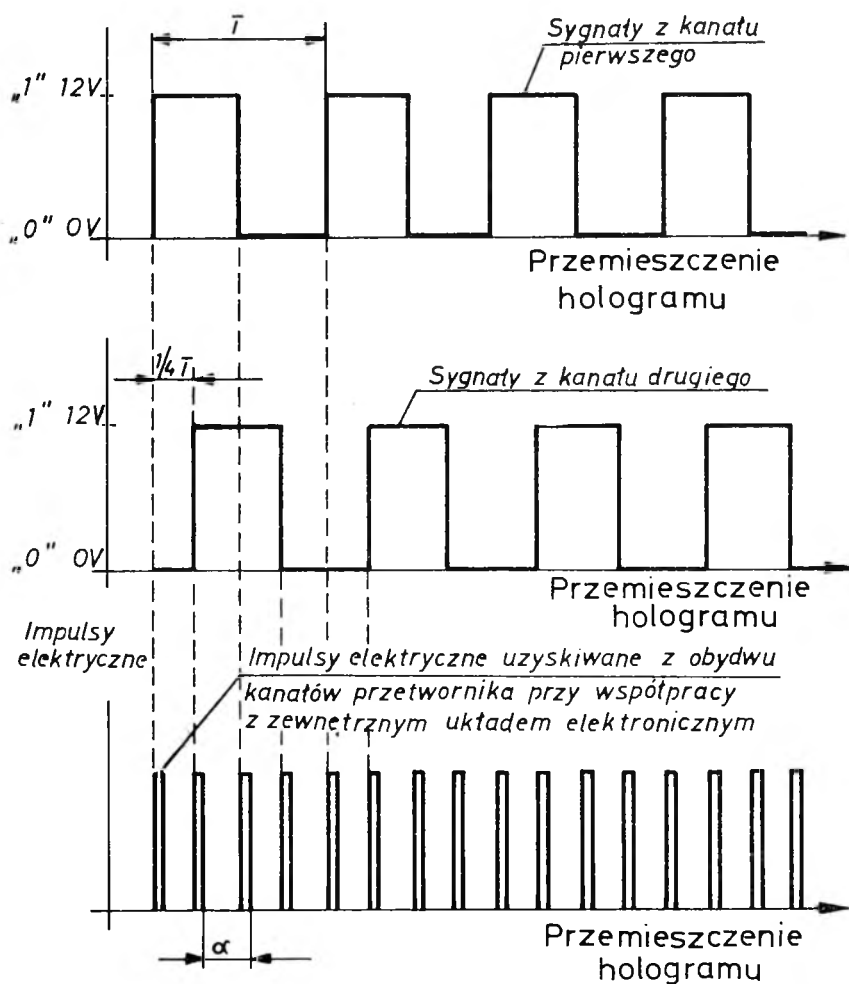
Po nieudanych próbach z zastosowaniem oświetlacza wewnętrznego ze względu na wpływy termiczne, użyto zewnętrznego oświetlacza halogenowego, dającego bardziej równomierne oświetlenie. Najlepszymi warunkami uzyskania równomiernego oświetlenia przy zachowaniu ostrego obrazu prążków były:

- 1 — napięcie zasilające oświetlacz 12 V,
- 2 — oświetlacz w odległości ok. 10 cm od zwierciadła płaskiego (za soczewkami wyjściowymi oświetlacza szklane matówki),
- 3 — kondensor mikroskopowy rozogniskowany,
- 4 — przesłona kondensora maksymalnie domknięta,
- 5 — przesłona kondensora oświetlacza otwarta.

Parametr	Wartość parametru
1. Ilość kanałów	2
2. Kształt sygnałów	prostokątny
3. Współczynnik wypełnienia impulsem dodatnim	$0,51 \pm 0,54\%$
4. Czas narastania	max 2,5 μ s
5. Czas opadania	max 1,0 μ s
6. Poziomy, logiczne sygnałów	
— „1”	10,0 ÷ 12V
— „0”	0 ÷ 0,5V
7. Częstotliwość graniczna jednego kanału	20 kHz
8. Zasilanie	12V $\pm$ 1% D. C. C



Rys. 19



Rys. 20

Na rysunku nr 20 pokazano przebiegi elektryczne na wyjściu układu WSF-2a podczas przemieszczania hologramu w przetworniku oraz ich zwielokrotnienie w układzie elektronicznym licznika rewersyjnego EWC-2.

3.4.1. Uwagi o eksploatacji przetworników

Funkcję detektorów w przetwornikach HKL-1, 2, 3 pełniły zarówno fotodiody 32F2, jak i fototranzystory BPYP21. Poprawna praca przetwornika z fotodiodą wymagała zoptymalizowania ilości światła otrzymywanego z oświetlacza zewnętrznego lub wewnętrznego, tak jak to omówiono w rozdziale 3.2. Potrzebna ilość światła przy zastosowaniu fototranzystorów BPYP21 była wielokrotnie mniejsza. Oba przetworniki przy zastosowaniu BPYP21 pracowały poprawnie nawet przy usunięciu soczewek skupiających.

Z drugiej jednak strony częstotliwość graniczna fototranzystorów jest co najmniej o rząd wielkości mniejsza niż fotodiod. Wobec powyższych faktów wybór odpowiedniego detektora wydaje się być zależny od konkretnego zastosowania przetwornika i podyktowany jest wymaganą szybkością przemieszczającej się podziałki. Wszystkie dotychczasowe układy elektroniczne przetworników miały wyłącznie ręczną regulację wzmocnienia (RRW). Wobec tego fakt, że każda zmiana stosunku generowanego sygnału zaciemnienia do sygnału rozjaśniania (podczas przemieszczenia hologramu) i poziomu tych sygnałów następująca na skutek:

- a) zmiennego zaczernienia hologramu,
 - b) zmian w odległości hologram — soczewka wejściowa obiektywu,
 - c) zmiany strumienia świetlnego oświetlającego hologram w funkcji czasu,
- uniemożliwia (bez zmiany RRW) zliczanie linii na większych odległościach.

Było więc konieczne, wobec powyższego, uzupełnienie układu elektronicznego dodatkowym systemem automatycznej regulacji wzmocnienia (ARW). W układ taki jest wyposażony przetwornik HKL-4.

Uruchamianie modeli przetworników było kłopotliwe i czasochłonne, na co złożyło się kilka czynników.

1. Duża wrażliwość użytych fotoelektronów na położenie punktu skupienia (wytworzonego przez soczewki skupiające), sygnału świetlnego z ekranów. Spowodowane to jest bardzo małą powierzchnią materiału półprzewodnikowego BPYP21, 32F2, biorącego udział w fotodetekcji sygnału. Udało się obniżyć tę wrażliwość przez usunięcie soczewek skupiających i umieszczenie fotoelementów tuż przy powierzchni ekranów. Użyto w tym wypadku fototranzystorów BPYP21 (użycie fotodiod 32F2 okazało się nie-

możliwe ze względu na zbyt małą czułość tych elementów). Generalnie rzecz biorąc, wydaje się uzasadniona rezygnacja z soczewek skupiających oraz zastosowanie fotodetektorów o dużej powierzchni półprzewodnika, umieszczonych w bezpośrednim sąsiedztwie ekranów.

Trudność w uzyskaniu efektu jednoczesnego rozjaśnienia i zaciemnienia całej powierzchni ekranów jest spowodowana:

a) deformacjami ekranów pod wpływem cięcia, warunków atmosferycznych (efekt został zminimalizowany przez zastosowanie ekranów wykonanych na szkło),

b) nierównoległością płaszczyzn ekranów i płaszczyzn ostrości rzutowanego obrazu siatki dyfrakcyjnej (niedokładne wykonanie elementów tworzących przetwornik, niedokładne ustawienie, w przypadku modelu HKL-3 i 4, pryzmatu),

c) niedokładnym wykonaniem pierścieni pośredniczących (równoległość płaszczyzn czołowych pierścienia, jego wysokość), wobec czego zarejestrowany obraz siatki nie był identyczny z obrazem siatki rzutowanym w przetworniku.

Wydaje się, że wpływy wymienione w c) można zminimalizować dwiema drogami. Pierwsza z nich to zwiększenie dokładności wykonania pierścieni, druga, bardziej skuteczna, to eksponowanie ekranów w ich przyszłym miejscu funkcjonowania, w konkretnym przetworniku.

3. Trudność z uzyskaniem właściwego przesunięcia fazowego między ekranami. W przypadku ekranu poddawanego przemieszczeniu zastosowano mało precyzyjny przesuw. Przesuw ten zdawał egzamin przy pracy przetwornika w oparciu o podziałki z gęstością 100 l/mm, przy gęstościach 250 l/mm pojawiły się pierwsze trudności. Będą się one potęgować ze wzrostem gęstości linii podziałek (wzrost gęstości linii na ekranach). Z przesuwem ekranu wiązało się poza tym zagadnienie ucieczki tego ekranu z obrazu ostrości rzutowanego obrazu oraz skręcanie jego płaszczyzny w stosunku do płaszczyzny obrazowej.

Zdecydowanie lepszą okazała się wersja pracy przetwornika przy oświetleniu zewnętrznym. Przy zastosowaniu oświetlacza wewnętrznego, na skutek ogrzewania przezeń korpusu mikroskopu oraz elementów przetwornika, wystąpiła „ucieczka” prążków hologramu z głębi ostrości obiektywu mikroskopowego. Nie wyklucza to w ogólności możliwości stosowania oświetlenia wewnętrznego. Rzecz jasna, musi to być jednak oświetlenie typu „zimnego” (przykładowo: diody luminescencyjne). Oświetlenie takie zastosowano w przetworniku HKL-4, w którym omówione mankamenty w modelach HKL-1, 2 i 3 nie wystąpiły.

3.4.2. Porównanie modeli HKL

Dokonując porównania realizacji modeli HKL1÷4 należy mieć na uwadze przede wszystkim ich niezawodność, wrażliwość miniaturyzacji oraz maksymalną sprawność optycznego toru informatycznego. Model HKL-3 został zrealizowany w celu zwiększenia sygnału świetlnego, docierającego do zespołu fotodetektorów. Praktyczna realizacja zastąpienia geometrycznego podziału strumienia (Model HKL-2) przez podział pryzmatem półprzepuszczalnym okazała się niedoskonała.

1. Spodziewany zysk energetyczny nie wystąpił z powodu:

- a) dużej absorpcji energii promienia przez pryzmat (20%),
- b) niemożności wykorzystania zaplanowanej, większej niż w modelu HKL-2 powierzchni ekranów, spowodowanej trudnościami uzyskania na niej ostrego obrazu prążków siatki, wynikającymi z właściwości zastosowanych obiektów mikroskopowych.

2. Wystąpiły bardzo duże trudności we właściwym ustawieniu pryzmatu. Pod pojęciem „właściwe ustawienie” rozumiemy przyjęcie przez pryzmat położenia nie powodującego skręcenia płaszczyzny obrazu w stosunku do płaszczyzny, w której umieszczono ekran.

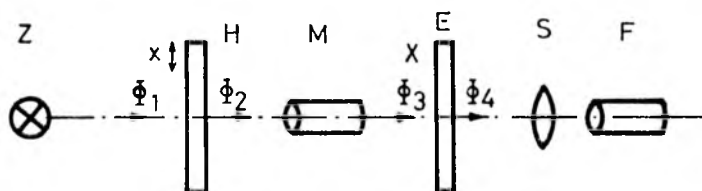
3. Umieszczenie ekranów w odległości ok. 6 cm jeden od drugiego w dwu różnych elementach konstrukcyjnych wpłynęło ujemnie na niezawodność działania modelu HKL-3. Każdy z ekranów przebywał w różnych warunkach, zmieniających się niezależnie względem siebie. Czynniki takie jak rozszerzalność cieplna materiałów, drgania i wstrząsy powodowały zarówno ucieczkę ekranów z obszaru ostrości rzutowanego obrazu, jak i zmianę przesunięcia fazowego między ekranami równoznaczną ze zmianą przesunięcia fazowego sygnałów elektrycznych uzyskiwanych z fotoelementów. W modelu HKL-2 wpływy te są o wiele mniejsze dzięki rozmieszczeniu na wspólnym elemencie nośnym, w bardzo bliskiej odległości jeden od drugiego. Wobec mniejszego stopnia skomplikowania modelu HKL-2, stoi on na pozycji uprzywilejowanej w problemie miniaturyzacji.

Biorąc pod uwagę powyższe spostrzeżenia słuszne będzie stwierdzenie, że na obecnym etapie realizacji modeli przetworników model HKL-2 okazał się konstrukcją najbardziej udaną. Dlatego w nowych modelach HKL należy przyjąć schemat ideowy zastosowany w modelu HKL-2 i podjąć próbę doskonalenia technologii (oświetlenie diodą luminescencyjną) jak i miniaturyzacji poszczególnych elementów. Istotnym ulepszeniem modelu HKL-4 w stosunku do poprzednich było zastosowanie (ARW), co zmniejsza wymóg co do jakości (równomierność gęstości optycznej) podziałek holograficznych, zliczanych przez przetworniki.

3.5. Funkcja przenoszenia strumienia świetlnego (T_p) przez układ przetwornika HKL

Schemat ideowy przetwornika przedstawiony na rysunku 16 w rozdziale 3.2 można zastąpić schematem jak na rysunku 21 i przyjąć następujące oznaczenia:

- Z — źródło strumienia świetlnego (oświetlacz),
- H — podziałka holograficzna o gęstości g_h ,
- M — obiektyw mikroskopowy,
- E — ekran (powiększony fragment podziałki holograficznej),
- S — soczewka skupiająca,
- F — fotodetektory.



Rys. 21

Funkcję przenoszenia strumienia świetlnego (T_p) przez układ przetwornika HKL możemy zdefiniować jako stosunek strumienia wchodzącego do fotodetektora promieniowania Φ_4 do strumienia skierowanego na podziałkę holograficzną Φ_1 skąd

$$T_p = \frac{\Phi_4}{\Phi_1}. \quad (18)$$

Wiadomo, że strumień fali świetlnej Φ_i jest określony wyrażeniem (19):

$$\Phi_i = I_i \cdot S_i, \quad (19)$$

gdzie I_i — natężenie fali świetlnej, S_i — element powierzchni (średnica wyjściowa obiektywu mikroskopowego).

Przyjmując, że fala świetlna Φ_i na każdym elemencie, przez który przechodzi jest tłumiona, i określając przez k współczynniki tego tłumienia mamy:

- k_H — współczynnik tłumienia podziałki holograficznej H,
- k_M — współczynnik tłumienia układu optycznego M,
- k_E — współczynnik tłumienia ekranu E.

Strumień Φ po kolejnym przejściu przez poszczególne elementy przetwornika możemy określić zależnościami (20; 21; 22):

$$\Phi_4 = \Phi_3 \cdot k_E, \text{ gdzie } k_E < 1, \quad (20)$$

$$\Phi_3 = \Phi_2 \cdot k_M, \text{ gdzie } k_M < 1, \quad (21)$$

$$\Phi_2 = \Phi_1 \cdot k_H, \text{ gdzie } k_H < 1. \quad (22)$$

Podstawiając wyrażenia (20; 21; 22) do (18) mamy:

$$T_p = \frac{\Phi_4}{\Phi_1} = k_H \cdot k_M \cdot k_E. \quad (23)$$

Przyjmujemy że:

k_H — jest funkcją gęstości podziałki g_H oraz parametrów obróbki fotochemicznej,

k_M — jest funkcją od λ , oraz parametrów konstrukcyjnych układu optycznego i w naszym przypadku ma wartość const,

k_E — jest funkcją gęstości ekranu g_E , parametrów obróbki fotochemicznej oraz współrzędnej przesunięcia i -tej kreski podziałki x_i .

Istnieje zależność g_E od g_H określona przez powiększenie układu mikroskopowego, które przyjmujemy równe m , określone wyrażeniem (24).

$$m \cdot g_H = g_E. \quad (24)$$

Dla n linii czarno-białych tłumienie ekranu k_E możemy określić zgodnie z zależnością (25)

$$k_E = \begin{cases} 0 & \text{dla } X \leq \left(\frac{m \cdot g_H}{2}\right) n = A, \\ \frac{m \cdot g_H}{2} & \text{dla } X \leq (m \cdot g_H) n = 0, \end{cases} \quad (25)$$

gdzie: n — ilość linii czarno-białych w polu widzenia obiektywu mikroskopowego.

Współrzędna przesunięcia ekranu X jest określona zależnością od x_i zgodnie z wyrażeniem (26)

$$X_i = m \cdot x_i. \quad (26)$$

Jeśli określimy funkcję przenoszenia strumienia świetlnego (T_p) w zależności od wzajemnego położenia podziałki H względem ekranu E , to jest ona określona zależnością (27),

$$T_p = f(x_i + \varphi), \quad (27)$$

gdzie

$$\varphi = X \pm m \cdot x_i,$$

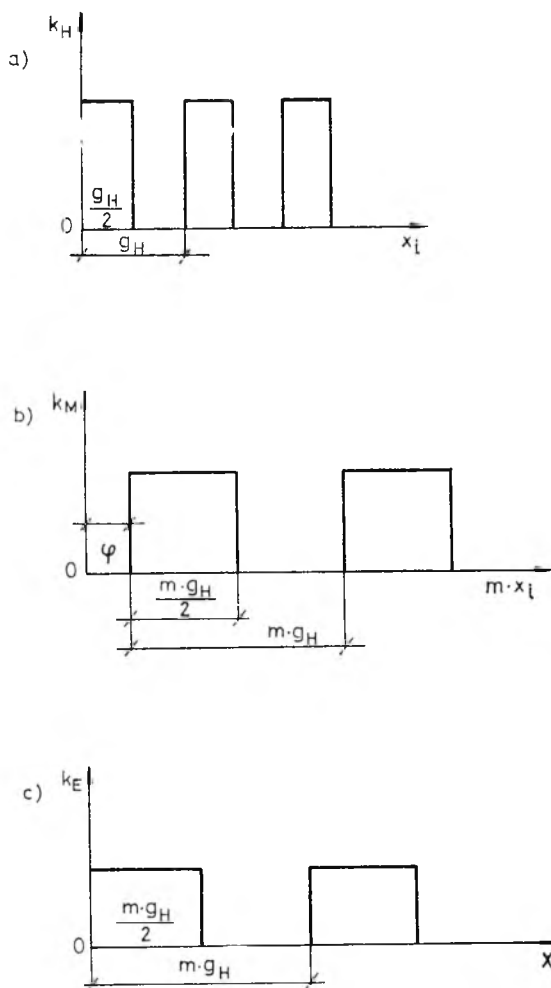
wtedy zależność określona wyrażeniem (23) możemy napisać w postaci (28)

$$T_p = k_M \cdot k_H(x_i) \cdot k_E \left(x_i \pm \frac{m \cdot g_H}{2} \right). \quad (28)$$

Zgodnie z zależnością (18) funkcja przenoszenia strumienia T_p jest zależna od strumienia Φ_4 przy założeniu, że $\Phi_1 = \text{const}$.

Obrazem funkcji tłumienia k_H strumienia Φ_2 przenoszonego przez podziałkę będzie rysunek 22a.

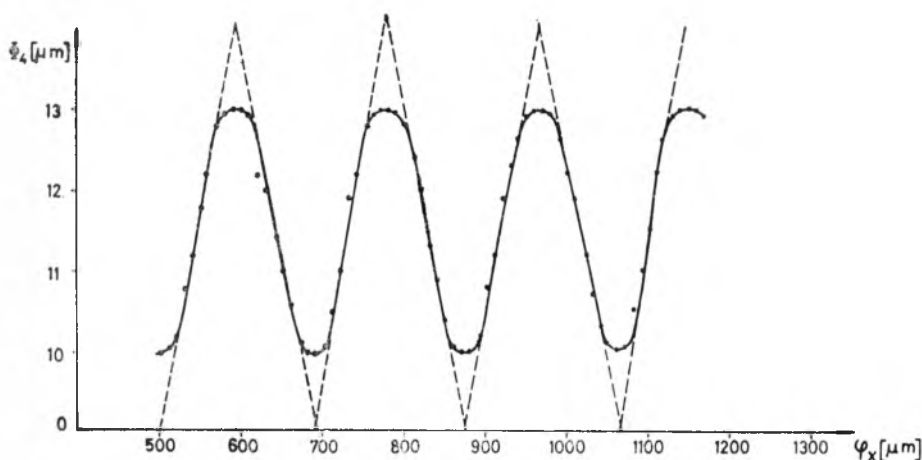
Obrazem funkcji tłumienia strumienia Φ_3 , przechodzącego przez układ optyczny będzie rysunek 22b.



Rys. 22

Jak to opisano w rozdziale 33 ekran powstał w procesie zarejestrowania na drodze fotograficznej strumienia Φ_3 . Obrazem funkcji tłumienia k_E będzie rysunek 22c.

W przypadku przemieszczenia się podziałki H w zależności od współrzędnej x_i na ekran E nałoży się powiększony przez układ optyczny obraz linii czarno-białych podziałki przedstawiony na rysunku 22b, którego efektem fizycznym będzie migotanie.



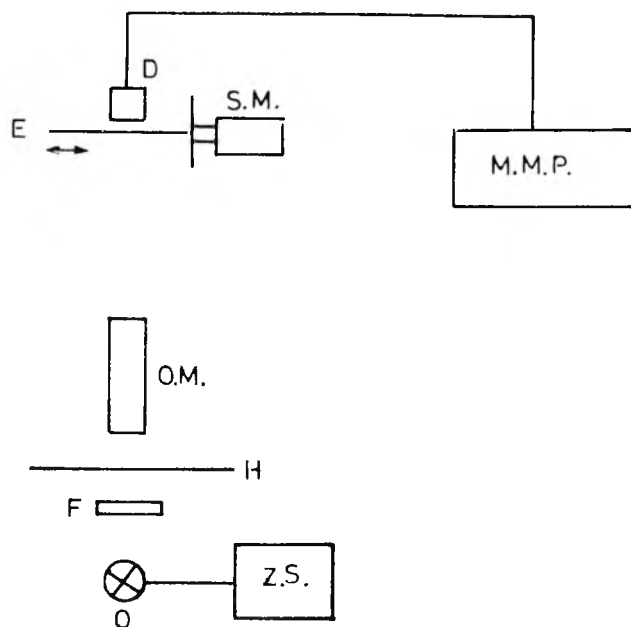
Rys. 23

Wtedy strumień przenoszony przez układ Φ_4 możemy przedstawić tak, jak na rysunku 23 (linia przerywana), a funkcję przenoszenia T_p określić wyrażeniem (29).

$$T_p = k_H \cdot k_M \cdot k_E = \begin{cases} l \cdot x_i & \text{dla } 0 \leq x_i \leq \frac{g_H}{2} n, \\ -l \cdot x_i & \text{dla } \frac{g_H}{2} \leq x_i \leq g_H \cdot n. \end{cases} \quad (29)$$

Rzeczywisty obraz strumienia Φ_4 , tak jak to wynika z przeprowadzonych badań przedstawionych na rysunku 23 (linia ciągła), odbiega od przypadku idealnego pokazanego linią przerywaną i jest podyktowany przyczynami opisanymi w rozdziałach 2 i 3, a w szczególności rozkładem natężeń wiązek światła spójnego w procesie naświetlania podziałki oraz procesami chemicznymi obróbki podziałki jak i ekranu. Badania przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 24 na którym oznaczono:

O — oświetlacz halogenowy $U_z = 10V$, PZO Nr 01422,
 $Z.S.$ — zasilacz stabilizowany Typ 5351 Unitra Unima Nr 001/74,
 F — filtr optyczny ($6000 \text{ \AA}$),
 H — podziałka holograficzna,
 $O.M.$ — obiektyw mikroskopowy PZO Nr 35910,
 E — ekran,
 $S.M.$ — śruba mikrometryczna,
 $M.M.P.$ — miernik mocy promieniowania $\lambda_{nom} = 6328A$, Electronic Shutter System ES-100, JODON USA.



Rys. 24

Ze względu na możliwości pomiarowe przemieszczano ekran E względem stałego położenia podziałki H , co pozwalało na znacznie większą swobodę przemieszczeń, wynikającą z powiększenia układu mikroskopowego przy zachowaniu istoty zależności określonej wyrażeniem (28).

Istotnym problemem w działaniu przetwornika HKL, a w szczególności zliczania ilości linii jest wielkość strumienia Φ_4 i jego zmiana w funkcji wejścia podziałki w pole widzenia obiektywu mikroskopowego. Zgodnie z zależnością (19), strumień Φ_4 przy $I_1 = \text{const}$ jest funkcją powierzchni S (średnicy wyjściowej obiektywu mikroskopowego). Uwzględniając zależność (25) powierzchnia S jest określona wielkością (30)

$$S = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{m \cdot g_H}{2} \cdot h_i, \quad (30)$$

gdzie h_i — wysokość pojedynczej linii w polu widzenia obiektywu mikroskopowego.

Przyjmując iż dla uzyskania określonego poziomu dyskryminacji układów przetwarzających zgodnie z rozdz. 3.4 potrzebny jest strumień, który oznaczamy przez Φ_w , wtedy możemy napisać warunek podany zależnością

$$\Phi_4 = I_1 \cdot \sum_{i=0}^{i=n} \frac{m \cdot g_H}{2} \cdot h_i > \Phi_w. \quad (31)$$

Z zależności (31) wynika ważna konkluzja praktyczna pozwalająca ze stosunku $\frac{\Phi_w}{\Phi_4}$ określić zakłócenia powierzchni

$$\sum_{i=0}^{i=n} \frac{m \cdot g_H}{2} \cdot h_i.$$

Przypadek taki może zaistnieć jeśli chcielibyśmy połączyć dwa odcinki podziałki, jak to ma miejsce w rozdziale 4, lub wystąpiłyby zakłócenia miejscowe podziałki powstałe w przypadku mechanicznego wytarcia kilku kresek itp. Przykładowe badania dla siatek o $g_H = 250$ l/mm pozwoliły na prace modelu HKL-4 przy zmniejszeniu strumienia przechodzącego przez ekran o 20%.

4. Transformacja holograficznej podziałki liniowej na podziałkę radialną i możliwości jej zastosowania do pomiaru kąta

4.1. Klasyczne sposoby wykonania kręgów podziałowych

W rozdziale 1 omówiono trudności i bariery występujące przy wykonywaniu kręgów podziałowych z precyzyjnym podziałem. Ze względu na technologię wykonania kręgów rozróżnia się następujące możliwości:²³

1. Wykonanie kręgów podziałowych stosowanych w teodolitach z optycznym odczytem wartości kątów z udziałem człowieka.
2. Wykonanie kręgów podziałowych stosowanych w teodolitach kodowych.

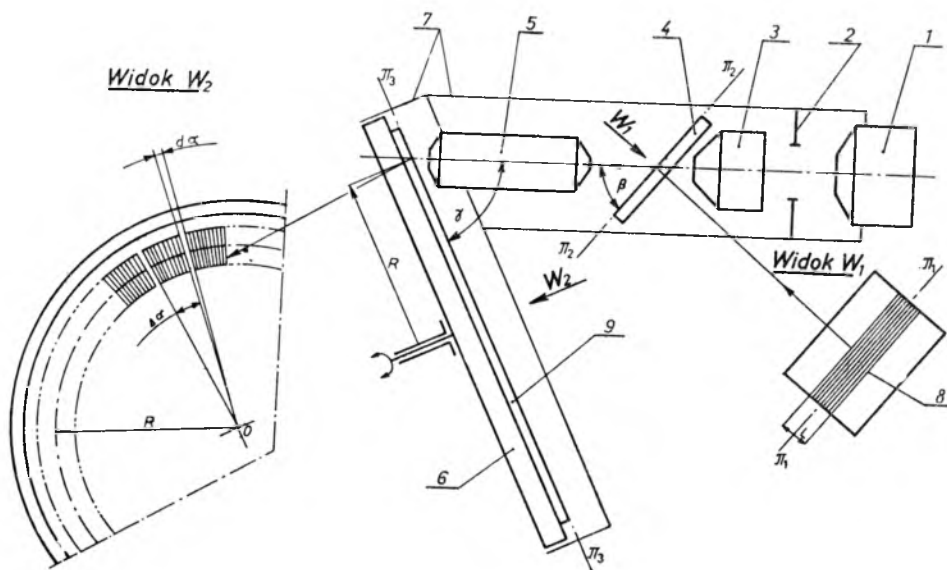
²³ Szymoński J.: *Instrumentoznawstwo geodezyjne* tom II, Warszawa PPWK, rok 1971.

W pierwszym przypadku należy wyróżnić dwa sposoby wykonania kręgów podziałowych.

Jeden z nich polega na wykonaniu poszczególnych kresk podziałowych i opisów indywidualnie na każdym kręgu. Drugi natomiast polega na wykonaniu matrycy, a następnie nanoszenie z niej całego obrazu na krąg podziałowy stosowany w teodolicie. W obu przypadkach podstawowy problem sprowadza się do wnoszenia każdej kreski oddzielnie i niemożności dużego zagęszczenia kresk oraz wysokich kosztów, które progresywnie wzrastają w miarę zwiększania się gęstości kresk na kręgu. Istotnym jest też to, że podczas nanoszenia kresk popełniamy błędy, które obciążają następnie sam pomiar kąta.

4.2. Istota metody transformacji holograficznej podziałki liniowej na podziałkę radialną

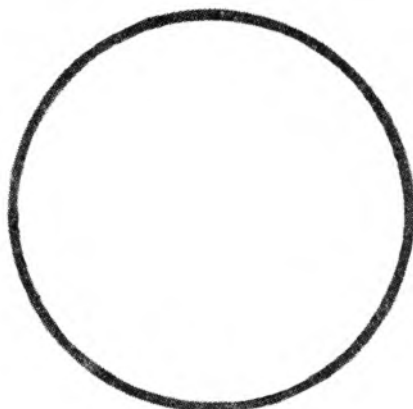
Istotą proponowanej metody jest wykorzystanie właściwości układu optycznego i przekształcenie wycinka holograficznej podziałki liniowej (wykonanej tak, jak to opisano w rozdziale 2 niniejszej pracy) przy pomocy równoległej względem osi optycznej układu wiązki światła na podziałkę zbieżną (radialną). Obraz tej podziałki rzutowany jest na krąg podziałowy w takim położeniu, że linie przechodzące przez kreski podziałki przecinają się w osi obrotu kręgu, a cały limbus kręgu podziałowego wy-



Rys. 25

konany jest z szeregu ekspozycji oddalonych od siebie o kąt odpowiadający kątowi pomiędzy sąsiednimi kreskami poszczególnych wycinków podziałki.²⁴ Mając do dyspozycji podziałkę zbieżną autor proponuje jej zliczanie za pomocą przetwornika opisanego w rozdziale 3.

Na rysunku 25 przedstawiono schemat urządzenia do transformacji w płaszczyźnie pionowej. Widok W_1 przedstawia płytkę transformowanej podziałki z zespołem kresek równoległych przed ich przetworzeniem. Widok W_2 przedstawia podział kręgu powstałego po przetworzeniu zespołu kresek równoległych na kreski zbieżne. Na fotografii 10 pokazano krąg wykonany w Instytucie Geodezji i Kartografii. Na fotografii 11 przedstawiono praktyczną realizację stanowiska do transformacji podziałek.



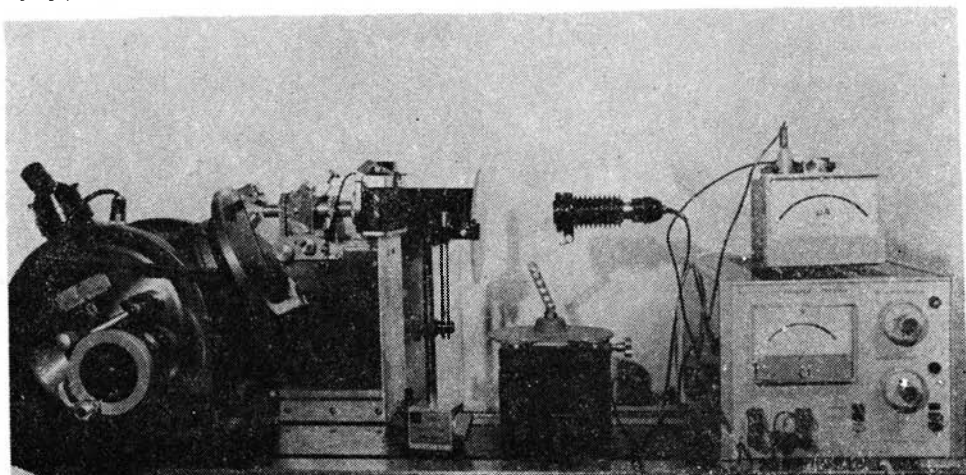
Fot. 10

Stanowisko do transformacji podziałek (rys. 25) składa się z następujących zespołów: oświetlacza (1), migawki (2), kondensora (3), pulpitu (4), układu projekcyjnego (5), obrotowej tarczy (6) i obudowy światłoszczelnej (7). Oś obrotu tarczy (6) i oś układu optycznego leżą w jednej płaszczyźnie π_1 . Na pulpicie (4) umieszczona jest przezroczysta płyta z naniesionym zespołem równoległych kresek (8) posadowionych w płaszczyźnie π_2 nachylonej pod kątem β do osi układu optycznego i prostopadłej do płaszczyzny π_1 . Zespół kresek o określonej ich ilości i szerokości L ustawiony jest równolegle do płaszczyzny π_1 i rozmieszczony symetrycznie po obydwu stronach tej płaszczyzny.

Na obrotową tarczę (6) nachyloną pod kątem γ w stosunku do osi układu optycznego nałożony jest krąg (9) zamocowany współśrodkowo z tarczą (6). Jedna powierzchnia kręgu leżąca w płaszczyźnie π_3 prostopadłej do płaszczyzny π_1 od strony układu projekcyjnego (5), pokryta jest wysokoroz-

²⁴ Układ optyczny stanowiska do transformacji podziałki liniowej na radialną został zaprojektowany przez dr A. Sojeckiego z Centralnego Laboratorium Optyki.

dzielczą warstwą światłoczułą. Ilość i gęstość kresek (8) umieszczonych w płaszczyźnie π_2 musi być tak dobrana, aby suma wszystkich pożądaných kresek na limbusie składała się z sumy wycinków limbusa (sumy ekspozycji).



Fot. 11

Posługiwanie się urządzeniem do transformacji podziałek sprowadza się do zamocowania kręgu (9) oraz płytki z kreskami (8), a następnie wykonania szeregu powtarzających się czynności. Do czynności tych należą: Ustawienie tarczy (6) w pozycji wyjściowej, naciągnięcie migawki, włączenie oświetlacza i wykonanie ekspozycji. Po wykonaniu ekspozycji tarczę (6) należy obrócić o kąt $\Delta\alpha + d\alpha$ i powtórzyć czynności kończące się następną ekspozycją. Po wykonaniu wszystkich ekspozycji krąg (6) wyjmuje się z przetwornika, a następnie wywołuje go i utrzuwa. Tak wykonany krąg może być użyty bezpośrednio w teodolicie lub może stanowić wzorzec do otrzymywania kręgów na drodze fotograficznego powielania. W przypadku powielania kręgów metodą stykową wzorzec wykonuje się w takiej samej skali, jak kręgi. Jeśli nas interesuje otrzymywanie kręgów w skali większej lub mniejszej niż matryca możemy do realizacji tego wymogu skorzystać z układu projekcyjnego. Zaletą opisaną metody jest otrzymanie b. równomiernego podziału kąta w zakresie jednej ekspozycji, jeśli jako zespołu kresek (8) używa się holograficznej podziałki liniowej.

4.3. Metody łączenia odcinków podziałki na kręgu teodolitu cyfrowego

Istotnym problemem w metodzie transformacji holograficznej podziałki liniowej na podziałkę radialną opisaną w podrozdziale 4.2. jest zapewnienie łączenia poszczególnych wycinków podziału kręgu przedstawionych

na rysunku 25 (widok W_2). Chodzi tu o spełnienie warunku, iż odległość pomiędzy dowolnymi kreskami sąsiednich ekspozycji powinna być wielokrotnością wartości kąta zawartego pomiędzy dwiema sąsiednimi kreskami łączonych fragmentów podziałki przedstawionej na rysunku 25 (widok W_1). Możemy tu postąpić dwojako:

4.3.1. Metoda łączenia odcinków podziałki na kręgu teodolitu cyfrowego przez zastosowanie wzorca o dokładności wyższej niż dokładność opracowywanego limbusa

Wielkość kąta $\Delta\alpha$ przedstawionego na rysunku 25 można realizować za pomocą narzędzia kątomierczego o dokładności wyższej niż dokładność jednej działki podziałki holograficznej, np. mocując tarczę (6) (rys. 25) na teodolicie Wilda T3, jeśli chcemy otrzymać limbus o dokładności teodolitu Wilda T2. Przy budowie stanowiska przedstawionego na fotografii 11 do obrotu tarczy (6) zastosowano podzielnicę optyczną produkcji f-my Zeiss Jena.

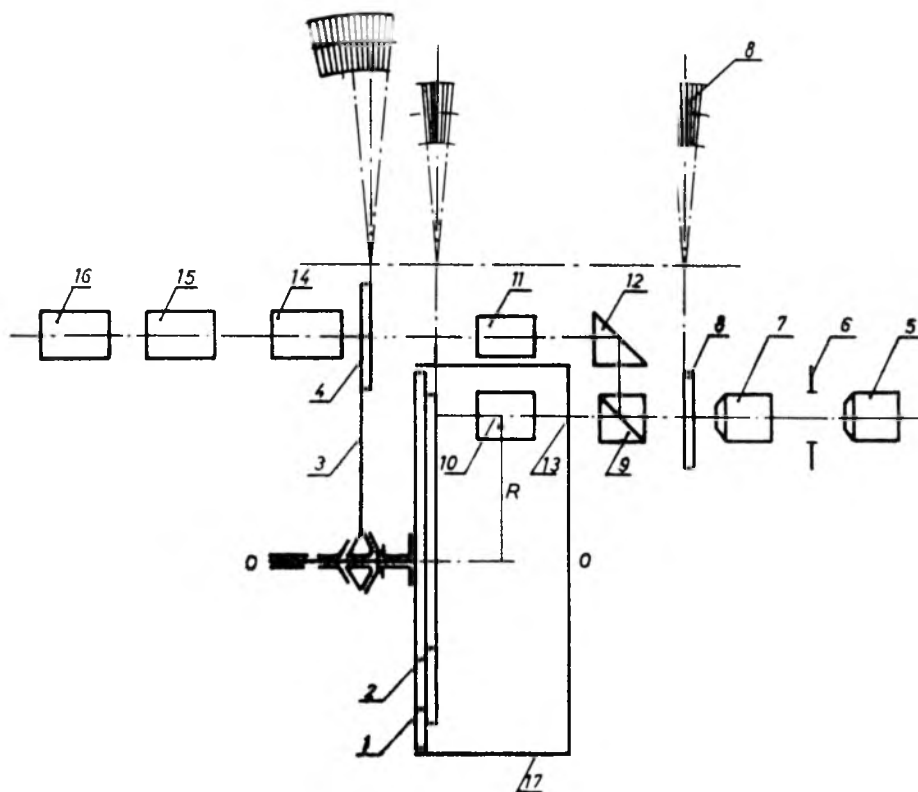
4.3.2. Istota metody łączenia odcinków podziałki na kręgu teodolitu cyfrowego o dużym zagęszczeniu kresek

Spełnienie warunku zakładającego, iż odległość pomiędzy dowolnymi kreskami kolejnych ekspozycji powinna być wielokrotnością wartości kąta zawartego pomiędzy dwoma sąsiednimi kreskami łączonych fragmentów podziałki przedstawionej na rysunku 25 — (widok W_1) jest możliwe jeśli się uwzględni rozważania przeprowadzone w podrozdziale 3.5. Ich logiczną konsekwencją jest takie wzajemne usytuowanie poszczególnych fragmentów podziałki zbieżnej w stosunku do ekranu przetwornika, aby strumień świetlny przenoszony przez układ, jak to przedstawiono na rysunku 23, był maksymalny i o okresie powtarzalnym. Z bibliografii²⁵ wiadomo, że jest możliwe określenie położenia max sygnału z dokładnością 1%. Jest to równoznaczne z odpowiedzią na temat spodziewanej dokładności wzajemnego usytuowania poszczególnych fragmentów podziałki na kręgu teodolitu.

4.3.3. Stanowisko do wykonania kręgów o dużym zagęszczeniu kresek

Na rysunku 26 przedstawiono schemat blokowy stanowiska do wykonania kręgów o dużym zagęszczeniu kresek zgodnie z istotą idei omówionej w podrozdziale 4.3.2.

²⁵ Łapiński M.: *Miernictwo Teleelektryczne*. WKiŁ, Warszawa 1962.



Rys. 26

4.3.3.1. Opis stanowiska do wykonania kręgów o dużym zagęszczeniu

Na osi obrotowej $O-O$ umieszczone są dwa zamienne elementy układu kinematycznego stanowiska — tarcza (1) z płytą światłoczułą (2) oraz ramię (3) z ekranem (4). Ramię (3) może być sprzęgane lub rozprzęgane z osią obrotu tarczy (1). Takie połączenie tych elementów zapewnia łączny ich obrót wokół osi $O-O$ lub obrót względem siebie tych elementów o 360° . W odległości R od osi obrotu $O-O$ znajduje się oś zasadniczego układu optycznego. Wzdłuż układu optycznego usytuowane są podstawowe zespoły stanowiska: oświetlacz (5), przysłona (6), kondensator (7), wzorzec podziałki radialnej (8), pryzmat światłodzielnący p i układ projekcyjny (10). Równolegle do tego układu optycznego umieszczony jest dodatkowy układ optyczny (11), który wspólnie z pryzmatem (12) przenosi część obrazu z wzorca (8) na ekran (4). Za ekranem ustawiony jest detektor promieniowania (14), z którego przesyłane są sygnały powstałe na skutek przesunięcia ekrana.

nu (4) względem wzorca (8) po ich ukształtowaniu do licznika (15) i do miernika (16). Szerokość ekranu powinna być większa od dwóch szerokości obrazu wzorca.

Po założeniu kręgu (2) z warstwą światłoczułą i zamknięciu go osłoną światłoszczelną (17) zamyka się również migawkę (13). Po włączeniu oświetlacza (5), wiązka światła uformowana przez przesłonę (6) i kondensor (7) oświetla wzorec (8). Obraz wzorca przenoszony przez pryzmat światłodzielnący (9) jest rozdzielony i kierowany dwoma niezależnymi torami. Jeden obraz, po przejściu przez otwór migawki i układ projekcyjny (10), jest rzutowany na warstwę światłoczułą płyty (2). Drugi obraz, po przejściu przez pryzmat (12) oraz przez układ optyczny (11), rzutowany jest na ekran (4). Dzięki takiemu rozdzieleniu obrazu wzorca (8) i umieszczeniu nieruchomo detektora promieniotwórczości (14) istnieje możliwość obrotu ekranu (4) wokół osi $O-O$, o zadaną ilość działek, a dołączając do tego możliwość sprzęgania i rozprzegania ramienia (3) z osią obrotu tarczy (1) istnieje również możliwość obrotu tarczy (1) o zadaną liczbę działek podziałki wzorcowej (8).

4.3.3.2. Wykonanie podziałki na kręgu

Praktyczne wykonywanie podziałki na kręgu jest następujące: po zamknięciu migawki (13) i włączeniu oświetlenia ramię (3) obraca się wokół osi $O-O$ do takiego położenia, aby obraz wzorca (8) ułożył się na brzegu ekranu (4), przy jednoczesnym uzyskaniu maksimum sygnału z detektora (14), mierzonego miernikiem (16). W takim położeniu sprzęga się ramię (3) z osią tarczy (1) i wykonuje pierwszą ekspozycję. Następnie ramię (3) wraz z tarczą (1) obraca się o kąt $\Delta\alpha + d\alpha$ z jednoczesnym zachowaniem max sygnału z detektora (14) mierzonego miernikiem (16) i wykonuje następną ekspozycję.

Po drugiej ekspozycji rozprzega się ramię (3) i tarczę (1) przy czym tarcza pozostaje nieruchomo, a ramię cofa się o kąt $(\Delta\alpha + d\alpha)$. Po cofnięciu i ponownym sprzęgnięciu ramienia i tarczy dokonuje się wspólnego obrotu tych części i wykonuje następną ekspozycję. Powtarzając te cykle wykonuje się wszystkie ekspozycje przewidziane dla danego kręgu. Istotnym będzie też moment zamknięcia podziałki na kręgu. Ilość ekspozycji x wynikająca z wyrażenia (32)

$$x = \frac{360^\circ}{\Delta\alpha + d\alpha} + \Delta f \quad (32)$$

powinna być tak dobrana, aby wielkość niezamknięcia podziałki Δf wyrażona ilością linii czarno-białych podziałki wzorcowej mieściła się w dopuszczalnej wartości zmiany sygnału określonej wyrażeniem (31), dla któ-

rej przetwornik będzie jeszcze pracował. Przykładowo: dla modelu kręgu przedstawionego na fotografii 10 o wielkości segmentów transformowanej podziałki wynoszącej 1 mm i składającej się z 100 l/mm, błąd niezamknięcia może osiągnąć wartość 0,1 mm, co nie zakłóca pracy przetwornika, jak to stwierdzono eksperymentem.

4.4. Możliwości wykorzystania wykonanych kręgów w teodolitach średniej klasy

W tabelicy 3 zestawiono średnice podziałki na kręgu w funkcji jej gęstości oraz wymagań co do wartości kątowej podziału dla teodolitów średniej klasy. Podano dwie wartości na średnicę d podziałki dla 4 impulsów z linii czarno-białej lub 8 impulsów w zależności od zastosowanej obróbki elektronicznej. Analizując zestawione wyniki w tabelicy 3 dochodzimy do wniosku, że np. krąg pokazany na fotografii o 100 l/mm pozwala przy średnicy

Tabela 3

Średnica kręgu d dla siatek o różnych gęstościach	Ilość impulsów dla poszcz. dokładności (t)					
	1 296 000	648 000	432 000	324 000	259 200	129 600
	1"	2"	3"	4"	5"	10"
$d = f (g_{400})$	257,831 128,916	128,916 64,458			51,566 25,783	25,783 12,892
$f (g_{300})$	343,775 171,887	171,887 85,944	114,592 57,296	85,944 42,972	68,755 34,377	34,377 17,189
$f (g_{250})$		206,265 103,132	137,510 68,755	131,312 65,656	82,506 41,253	41,253 20,623
$f (g_{200})$			171,887 83,944	128,916 64,458	103,132 51,556	51,566 25,783
$f (g_{150})$				171,887 85,944	137,510 68,755	68,755 34,377
$f (g_{100})$					206,265 103,132	103,132 51,566
$f (g_{50})$					412,530 206,265	206,265 103,132
$f (g_{25})$						412,530 206,265

$$\text{gdzie } d [\text{mm}] = \frac{t}{\pi \cdot g \cdot i}$$

g — gęstość podziałki na 1 mm, i — ilość impulsów z linii czarno-białej

$d = 103$ mm uzyskać wartość kątową 1 działki 5'' przy 8 impulsach z linii czarno-białej. Ponieważ w Instytucie opanowano technologię zliczania podziałek około 500 l/mm pozwala to w najbliższej przyszłości wytwarzać kręgi o dokładności $1 \div 2''$, z możliwością automatycznego ich czytania wg systemów przedstawionych w publikowanej pracy.

5. Wnioski

1. W wyniku rozważań teoretycznych i przeprowadzonych eksperymentów opracowano metodę wykonania holograficznej podziałki liniowej o zadanej gęstości i podziałek teodolitów cyfrowych na drodze przetwarzania podziałki liniowej na podziałkę radialną.

2. Opracowano sposób i urządzenia do automatycznego pomiaru liczby linii na podziałce w postaci przetwornika przemieszczeń wielkości liniowej oraz radialnej z cyfrową prezentacją wyniku.

3. Zaproponowana metoda łączenia wycinków podziałki radialnej może znaleźć zastosowanie do wykonania dowolnej długości podziałek liniowych na drodze wielokrotnego powielenia odcinka wzorcowego holograficznej podziałki liniowej.

4. Opracowane podziałki charakteryzują się brakiem miejsc uprzywilejowanych związanych z jej opisem co w znacznym stopniu upraszcza obróbkę informacji uzyskanego wyniku pomiaru.

5. Opracowane podziałki charakteryzują się wielką precyzją pomiaru wynikającą z istoty zjawisk interferencyjnych, jak i zastosowaniem wzorca związanego z użyciem światła spójnego.

6. Opracowane i wykonane podziałki mogą znaleźć zastosowanie w instrumentach geodezyjnych i fotogrametrycznych, w których jest wymagany automatyczny pomiar odległości i kąta z cyfrową prezentacją wyniku.

7. Z uwagi na możliwość czytania opracowanych podziałek w warunkach statycznych i dynamicznych mogą one znaleźć zastosowanie w automatyce przemysłowej — stwarzając dogodne warunki do współpracy z komputerem.

Recenzował doc. dr hab. Zdzisław Adamczewski

Rękopis złożono w Redakcji w lipcu 1977 r.

ХЕНРЫК З. КОВАЛЬСКИ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ КОГЕЗИОННОГО СВЕТА (ЗАРЕГИСТРИРОВАННОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОЛЯ) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Резюме

Длина и угол являются основными геометрическими величинами подверженными измерению. Величины эти и их измерения являются существенные для количественного (цифрового) изображения многих явлений, происходящих в производственном процессе человек — орудие и входящих в объем заинтересования многих научных дисциплин.

Удовлетворение требований точности геодезии разрешит удовлетворить нужды других отраслей. Если развитие радиолокации и лазерной техники разрешают вопросы измерения длины, в особенности на большие расстояния, то измерение угла и длины на коротких отрезках принадлежат к тем операциям где прогресс главным образом в их автоматизации недостаточен.

В результате теоретических рассуждений и произведенных опытов автор разработал метод изготовления голографической линейной шкалы, требуемой густоты и шкалы цифровых теодолитов путём преобразования линейной шкалы на радиальную.

Разработанные шкалы по этому методу характеризуются большой точностью измерения вытекающей как из сущности интерференционных явлений, так и из применения образца длины связанного с использованием когезионного света.

Разработаны также способ и устройство для автоматического измерения числа линий на шкале в виде преобразователя перемещений линейной и угловой величины с цифровым представлением результата. Предложено также метод образования линейных шкал произвольной длины путём многократного размножения образцового отрезка голографической линейной шкалы.

Разработанные шкалы характеризуются отсутствием привилегированных мест, связанных с их пояснением, что в значительной степени упрощает обработку информации полученного результата измерения.

Разработанные и изготовленные шкалы могут найти применение в геодезических и фотограмметрических инструментах, от которых требуется автоматическое измерение угла и расстояний на коротких отрезках с цифровым представлением результатов.

Существует также возможность применения шкал, согласно методами описанным автором, в промышленной автоматике. Таковы шкалы могут создать благоприятные условия для сотрудничества с электронной вычислительной машиной.

HENRYK Z. KOWALSKI

THE USE OF COHERENT LIGHT INTERFERENCE (REGISTERED INTERFERENCE PATTERN) FOR MEASUREMENT OF LINE AND ANGLE QUANTITIES

S u m m a r y

There are two basic measured geometric quantities — length and angle. These quantities and their measurement are important for quantitative (numerical) presentation of many phenomena existing in man—machine process and are of interest for many branches.

Satisfaction of accuracy requirements in surveying allows to satisfy the needs of the other branches. Whereas, the development of radiolocation and laser technique solves the problems of length measurements particularly for longer distances, the progress of the measurements of length and angle for short distances is unsatisfactory, specially in aspect of automatization.

As a result of theoretical considerations and conducted experiments author prepared the metod of making the scales for digital theodolite by means of transformation of holographic line scale with the required density to the radial scale. The prepared scales are characterized by the great precision of measurement resulting from the substance of interference phenomena and by the application of length standard connected with coherent light application.

The way and the device for automatic measurement of number of lines on the scale in the form of converter of displacement of line and angle quantities with the digital result presentation was also investigated.

The method of joining the parts of radial scale was proposed for making the line scale of any length by means of multiple duplication of the standard section of holographic line scale.

As a result of researchs the scale without privileged places connected with its description was made, which considerably simplifies the processing of the obtained result of measurement. Prepared and made scales can be used in surveying and photogrammetric instruments, in which the automatic measurement of length and angle on the short distances is required with the digital presentation of the result.

There is a possibility of using the scales wods described by the author in the measurements for industrial purposes. Results of the measurements obtained using holographic scales and reading devices (displacement converter) can be transmitted to the computer too.