

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **220168**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **397932**

(51) Int.Cl.
G01C 3/08 (2006.01)
G01S 17/10 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **30.01.2012**

(54)

Sposób i urządzenie do zdalnego pomiaru odległości

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

05.08.2013 BUP 16/13

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

30.09.2015 WUP 09/15

(73) Uprawniony z patentu:

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

GRZEGORZ WIECZOREK, Zabrze, PL

(74) Pełnomocnik:

rzec. pat. Urszula Ziółkowska

PL 220168 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób i urządzenie do zdalnego pomiaru odległości. Urządzenie może znaleźć zastosowanie w takich dziedzinach jak geodezja, budownictwo, automatyzacja procesów przemysłowych, inwentaryzacja, systemy zobrazowania przestrzennego.

Znanych jest wiele metod zdalnego pomiaru odległości. Najszerze zastosowanie znajdują metody wykorzystujące odpowiednio zmodulowany sygnał optyczny z wyjścia lasera. W przypadku dalmierzy laserowych wyróżnić można dwie główne grupy metod pomiaru odległości. Do pierwszej grupy można zaliczyć te, które wykorzystują pomiar fazy sygnału modulującego strumień świetlny, natomiast w drugiej grupie mieszczą się metody, w których stosuje się pomiar czasu przelotu impulsu świetlnego. Dalmierze, których zasada działania oparta jest na pomiarze fazy, charakteryzują się dużą rozdzielczością pomiarów, jednakże ich zasięg działania jest ograniczony małą mocą sygnału optycznego. Urządzenia wykorzystujące pomiar czasu przelotu impulsu świetlnego umożliwiają osiągnięcie znacznie większych zasięgów pomiaru, jednakże rozdzielczość takich pomiarów jest ograniczona.

Znane są rozwiązania dalmierzy laserowych wykorzystujących do modulacji sygnału optycznego ciągi pseudolosowe. W układach tych sygnał pseudolosowy służy do zwiększenia jednoznaczności wyniku (problem niejednoznaczności pomiaru fazy w przypadku modulacji sygnałem okresowym) lub też zwiększenia odporności na niepożądane sygnały. Jedno z rozwiązań zostało przedstawione w opisie patentowym DE19949803A1 („Abstandsmessvorrichtung”). Metoda ta polega na wielokrotnym powtarzaniu cyklu pomiarowego (pełny ciąg pseudolosowy) ze zmienionym każdorazowo opóźnieniem. Analiza sygnału na wyjściu korelatora umożliwia wychwycenie przedziału czasowego, w którym pojawia się maksimum i na tej podstawie wyznaczenie szukanego opóźnienia sygnału. W innej metodzie pomiaru odległości, opisanej w zgłoszeniu patentowym USA nr US2003/0048430A1 („Optical Distance Measurement”), moduluje się sygnał optyczny ciągiem pseudolosowym i wysyła w kierunku obiektu, po czym odbity sygnał odbiera się przy pomocy fotodetektora przekształcającego sygnał optyczny na elektryczny, który z kolei przetwarza się do postaci cyfrowej, a następnie przeprowadza się zgrubną korelację sygnału, po czym dokonuje się serii dokładnych korelacji i na ich podstawie wyznacza się najlepiej dopasowane proste odtwarzające zbrocza funkcji autokorelacji i na tej podstawie określa się położenie maksimum tej funkcji. Metoda ta wymaga mniejszej liczby cykli pomiarowych do estymacji opóźnienia sygnału niż wcześniej opisana, jednakże liczba operacji wykonywanych w celu przeliczenia jest dalej znacząca.

Stosowanie sygnałów pseudolosowych w dalmierzach niesie szereg korzyści takich, jak na przykład zwiększona odporność na zakłócenia, czy jednoznaczność pomiarów odległości, jednakże rozdzielczość pomiaru odległości w znanych rozwiązaniach jest ograniczona. Analiza właściwości powszechnie stosowanych sposobów pomiaru czasu opóźnienia sygnału, w których wykorzystywane są sygnały pseudolosowe, wskazuje na konieczność stworzenia nowych metod, które umożliwią wykonywanie szybszych i precyzyjniejszych pomiarów odległości przy jednoczesnym zachowaniu zalet charakteryzujących istniejące rozwiązania.

Sposób zdalnego pomiaru odległości, w którym moduluje się sygnał optyczny ciągiem pseudolosowym i wysyła się w kierunku obiektu, po czym odbity sygnał odbiera się przy pomocy fotodetektora przekształcającego sygnał optyczny na elektryczny według wynalazku polega na tym, że sygnał z generatora pseudolosowego doprowadzony do modulatora optycznego opóźnia się w układzie opóźniającym o czas τ_s , korzystnie czas równy jednej czwartej czasu T_c trwania jednego bitu sekwencji pseudolosowej, a sygnał elektryczny z fotodetektora przetwarza się z pomocą komparatora na jednobitowy ciąg cyfrowy, który próbkuje się przerzutnikiem D, a następnie przemnaża się go w pierwszej bramce XOR przez opóźniony o czas τ' ciąg pseudolosowy z generatora PN i jednocześnie przemnaża się go w drugiej bramce XOR przez opóźniony czas τ' i dodatkowo o czas T_c ciąg pseudolosowy z generatora PN, po czym wysokim stanem na wyjściu pierwszej bramki XOR aktywuje się pierwszy licznik i zlicza się impulsy o częstotliwości F_s z generatora VCO i jednocześnie wysokim stanem na wyjściu drugiej bramki XOR aktywuje się drugi licznik i zlicza się impulsy o częstotliwości F_s z generatora VCO, a następnie liczby zliczonych impulsów w pierwszym liczniku i w drugim liczniku przekazuje się do nadrzędnego układu sterująco-przetwarzającego, korzystnie mikrokontrolera.

Sposób według wynalazku polega na tym, że stosunek częstotliwości próbkowania F_s do częstotliwości F_{PN} taktowania generatora ciągu pseudolosowego wyraża się ułamkowym współczynnikiem γ , którego wartość przyjmuje się z zakresu 3.995 do 31.99, korzystnie przyjmuje się wartość 15.99.

Sposób według wynalazku polega na tym, że w nadrzędnym układzie sterująco-przetwarzającym, korzystnie mikrokontrolerze, wyznacza się różnicę liczby zliczonych impulsów w drugim liczniku i pierwszym liczniku, po czym wynik mnoży się przez współczynnik korekcyjny nachylenia funkcji autokorelacji i uzyskuje się licznik cząstkowego opóźnienia sygnału, następnie sumuje się liczbę zliczonych impulsów w pierwszym liczniku i drugim liczniku, po czym odejmuje się wartość skorygowanej długości ciągu pseudolosowego i uzyskuje się mianownik cząstkowego opóźnienia sygnału, następnie cząstkowe opóźnienie sygnału powiększa się o numer zakresu pomiarowego, po czym całość mnoży się przez jedną czwartą długości fali modulującej i uzyskuje się odległość.

Urządzenie do zdalnego pomiaru odległości zawierające modulator sygnałów optycznych i fotodetektor przekształcający sygnał optyczny na elektryczny według wynalazku charakteryzuje się tym, że wyjście generatora pseudolosowego, korzystnie generatora ciągu maksymalnej długości, jest połączone z wejściem układu opóźniającego, z którego opóźniony sygnał podany jest do wejścia modulatora optycznego, jednocześnie wyjście układu fotodetektora jest połączone do wejścia odwracającego komparatora, którego wyjście wprowadzone jest na wejście danych przerzutnika D, którego wejście zegarowe połączone jest z wyjściem generatora VCO, a wyjście zwarte jest z pierwszymi wejściami pierwszej i drugiej bramki XOR, gdzie sygnał z wyjścia pierwszej bramki XOR wprowadzony jest do wejścia zezwalającego pierwszego licznika, a sygnał z wyjścia drugiej bramki XOR wprowadzony jest do wejścia zezwalającego drugiego licznika, jednocześnie na wejścia zegarowe liczników podany jest sygnał z wyjścia generatora VCO, a ich wyjścia połączone są do nadrzędnego układu sterującego, korzystnie mikrokontrolera, ponadto drugie wejście pierwszej bramki XOR połączone jest z wyjściem układu opóźniającego, a drugie wejście drugiej bramki XOR połączone jest z wyjściem dodatkowego układu opóźniającego.

Przedmiot wynalazku przedstawiono na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia schemat blokowy urządzenia, Fig. 2 pokazuje kształt idealnej funkcji autokorelacji, Fig. 3 prezentuje kształt rzeczywistej funkcji autokorelacji.

Nadrzędny generator (101) i o dużej stałości częstotliwości generuje sygnał o częstotliwości $2F_{PN}$, która jest następnie dwukrotnie dzielona w układzie (102). Sygnał o częstotliwości F_{PN} taktuje generator ciągu pseudolosowego (103) o długości L_{PN} bitów. Czas trwania jednego bitu sekwencji pseudolosowej jest równy $T_c = 1/F_{PN}$. Sygnał pseudolosowy $f_i(t)$ z wyjścia generatora (103) jest dodatkowo opóźniany w układzie opóźniającym (105) o stały czas τ_s , którego wartość może być dość swobodnie dobrana, jednakże korzystnie czas τ_s równy jest $1/4 T_c$. Opóźniony sygnał pseudolosowy moduluje sygnał optyczny lasera w układzie modulatora optycznego 106. Sygnał świetlny z wyjścia nadajnika optycznego (106) jest emitowany w kierunku obiektu mierzonego (107), który odbija światło w kierunku odbiornika (108) składającego się z fotodiody i stopni wzmacniających sygnał elektryczny. Odebrany sygnał jest dalej przetwarzany do postaci cyfrowego sygnału jednobitowego w układzie komparatora (109), po czym doprowadzony zostaje do wejścia danych przerzutnika D (111), który pełni w układzie funkcję cyfrowego układu próbkująco-pamiętającego. Próbkowanie odbywa się z częstotliwością F_s , a sygnał próbkujący jest generowany w układzie VCO 117 z pętlą fazową PLL, dla której częstotliwość odniesienia podana jest z generatora wzorcowego (101). Spróbkowany jednobitowy sygnał z wyjścia przerzutnika D (111) jest doprowadzony do wejść dwóch bramek XOR (112) i (113), które pełnią funkcję układów mnożących w dwóch niezależnych torach korelatorów cyfrowych. Pełny korelator cyfrowy, w każdym z dwóch torów, składa się z bramki XOR oraz połączonego z nią licznika binarnego. Liczniki pełnią funkcję analogiczną do układu całkującego w klasycznym korelatorze analogowym. Wysoki stan na wyjściach bramek XOR (112) i (113) aktywuje zliczanie impulsów zegarowych w układach liczników (114) i (115). Impulsy zegarowe mają częstotliwość F_s i są doprowadzone z wyjścia generatora VCO (117). Czas trwania jednego pełnego cyklu pomiarowego dalmierza jest równy okresowi pełnej sekwencji pseudolosowej, czyli $L_{PN} \cdot T_c$ (L_{PN} – długość ciągu pseudolosowego, T_c – czas trwania jednego bitu sekwencji pseudolosowej). W tym czasie liczniki (114) i (115) zliczają liczbę impulsów zależną od zgodności (stopnia skorelowania) sygnału odebranego z odpowiednio opóźnionymi replikami ciągu pseudolosowego z generatora (103). Po zakończeniu cyklu pomiarowego (wygenerowaniu pełnego ciągu PN) stan liczników jest odczytywany przez nadrzędny układ sterujący (116), i który korzystnie jest w postaci mikrokontrolera, po czym liczniki zostają wyzerowane. Wartości M_E oraz M_L , odpowiadające liczbie impulsów zliczonych przez liczniki (114) i (115), bezpośrednio służą do wyznaczenia czasu opóźnienia propagacyjnego sygnału, a co za tym idzie, do określenia odległości L_x pomiędzy obiektem (107) i dalmierzem.

Właściwości funkcji autokorelacji ciągu pseudolosowego maksymalnej długości pozwalają na bezpośrednie wyznaczenie opóźnienia sygnału na podstawie wartości z wyjść dwóch korelatorów.

Na Fig. 2 przedstawiono fragment obejmujący maksimum funkcji autokorelacji m-ciągu. Przykładowo jeśli całkowite opóźnienie odebranego przez odbiornik (108) sygnału pseudolosowego względem sygnału z generatora (103) wynosi $\Delta\tau$, to na wyjściach korelatorów pojawią się wartości odpowiadające punktom „E” i „L”. Można zauważyć, że stosując proste przekształcenia możliwe jest określenie opóźnienia $\Delta\tau$ wprost z wartości „E” i „L”. Ponieważ korelatory wykorzystują liczniki binarne, to współrzędne punktów „E” i „L” są określone przez odpowiednio przekształcone wartości wyrażające liczbę zliczonych impulsów. Częstkowe opóźnienie sygnału można wyrazić przez:

$$\delta\tau = \beta \frac{(M_L - M_E)}{M_E + M_L + M_0}$$

gdzie:

- M_E – wartość zliczona w liczniku (114),
- M_L – wartość zliczona w liczniku (115),
- β – współczynnik korekcyjny kształtu funkcji autokorelacji,
- M_0 – skorygowana długość m-ciągu.

Skorygowana długość ciągu pseudolosowego M_0 wyrażona jest przez iloczyn rzeczywistej długości sekwencji pseudolosowej L_{PN} i współczynnika nadpróbkiowania γ . Idealna funkcja autokorelacji odpowiada przypadkowi, w którym widmo sygnału nie jest ograniczane pasmowo. W rzeczywistych warunkach, ze względu na ograniczoną szerokość pasma przenoszenia nadajnika i odbiornika, funkcja autokorelacji sygnału odebranego nie będzie mieć idealnego trójkątnego kształtu, a jej zbocza będą bardziej nachylone, przez co konieczne jest zastosowanie współczynnika korekcyjnego. Porównanie kształtów idealnej i rzeczywistej funkcji autokorelacji przedstawiono na Fig. 3. Współczynnik korekcyjny β wyraża się:

$$\beta = \beta_1 \frac{L_{PN} - 1}{L_{PN} + 1}$$

gdzie:

- L_{PN} – długość ciągu pseudolosowego,
- β_1 – stosunek nachylenia zboczy idealnej funkcji autokorelacji, do nachylenia zboczy rzeczywistej funkcji autokorelacji.

Całkowite opóźnienie propagacyjne przekłada się wprost na długość drogi przebytą przez światło od nadajnika (106) do odbiornika (108):

$$L = \frac{1}{2} \lambda_m [\delta\tau + k + 1]$$

gdzie:

- λ_m – zastępcza długość fali sygnału modulującego,
- k – numer zakresu pomiarowego.

Zastępcza długość fali sygnału modulującego jest równa:

$$\lambda_m = \frac{c}{n} T_C$$

gdzie:

- c – prędkość światła w próżni,
- n – współczynnik załamania ośrodka,
- T_C – czas trwania jednego bitu ciągu pseudolosowego.

Rzeczywista wartość odległości obiektu (107) od dalmierza wymaga skorygowania wyniku pomiaru o wartość L_0 , odpowiadającą wynikowi pomiaru przy odległości równej zero:

$$L_X = \frac{1}{2}L - L_0 = \frac{1}{4} \frac{c}{n} T_C \left[\beta \frac{(M_L - M_E)}{(M_E + M_L - M_0)} + k + 1 \right] - L_0$$

Funkcje autokorelacji przedstawione na Fig. 2 i Fig. 3 odpowiadają przypadkowi, gdy sygnały korelowane są w postaci ciągłej. Jednakże w sposobie według wynalazku korelacji podlegają sygnały dyskretne, co powoduje również zdyskretyzowanie kształtu funkcji autokorelacji, która zamiast kształtu trójkątnego przybiera kształt schodkowy. Fakt ten bezpośrednio wpływa na możliwą do osiągnięcia rozdzielczość pomiaru czasu opóźnienia propagacyjnego, a co za tym idzie rozdzielczość pomiaru odległości. Przykładowo dla częstotliwości próbkowania F_S rzędu 500 MHz rozdzielczość wyznaczania odległości byłaby rzędu 30 cm. W celu zwiększenia rozdzielczości pomiarów należy doprowadzić do sytuacji, w której schodkowy charakter dyskretnej funkcji autokorelacji zostanie „rozmyty”. Rozwiązaniem jest taki dobór częstotliwości próbkowania F_S w stosunku do częstotliwości taktowania ciągu pseudolosowego F_{PN} , że wzajemny stosunek tych częstotliwości, wyrażony przez współczynnik nadpróbkowania γ , jest niecałkowity. Efekt „rozmycia” jest tym lepszy, im większą wartość ma współczynnik γ , a zarazem im bliższa jedności lub zeru jest jego część ułamkowa. Zastosowanie niecałkowitego współczynnika nadpróbkowania, w połączeniu z odpowiednią długością m-ciągu, pozwala na osiągnięcie bezwzględnej niepewności pomiarowej odległości znacznie poniżej 1 mm. Wartość współczynnika γ można dobierać z dość dużą swobodą, jednakże rzeczywiste ograniczenia wynikające z maksymalnej częstotliwości próbkowania oraz możliwego do osiągnięcia wzajemnego rozstrojenia generatorów (101) i (117) zawężają praktyczny zakres wartości γ .

Korzystnie współczynnik nadpróbkowania może przybrać wartość np. 15.99.

Wartość współczynnika k zależy od zakresu pomiarowego odległości. Teoretycznie opóźnienie sygnału odniesienia (a tym samym zmiana zakresu) mogłoby się zmieniać ze skokiem T_C , jednakże ze względu na fakt, że rzeczywisty odebrany sygnał jest pasmowo ograniczony, kształt rzeczywistej funkcji autokorelacji m-ciągu odbiega od kształtu idealnej funkcji autokorelacji. Zniekształcenie funkcji autokorelacji jest szczególnie widoczne w okolicy maksimum. Z tego względu preferowane jest stosowanie zakresów opóźnienia sygnału odniesienia ze skokiem $T_C/2$ i taki dobór opóźnienia, żeby wyniki korelacji obydwu korelatorów mieściły się w zakresie od $1/4$ do $3/4$ wartości maksimum. Preferowany zakres, w którym powinny się mieścić wyniki korelacji, jest ograniczony poziomami C_L i C_H na Fig. 3.

Sposób według wynalazku pozwala w bardzo szerokim zakresie zapanować nad błędami pomiarowymi. Przy założeniu, że współczynnik γ został optymalnie dobrany, bezwzględną niepewność pomiarową można przybliżyć zależnością:

$$\sigma_{Lx} \approx \frac{c}{2n} \frac{1}{F_{PN}} \sqrt{\frac{1}{SNR L_{PN}}}$$

gdzie:

SNR wyraża stosunek mocy sygnału do mocy szumu na wejściu komparatora (109).

Sposób według wynalazku umożliwia wykonywanie precyzyjnych pomiarów odległości nawet w warunkach, w których $SNR \ll 1$. Wymagane jest wtedy odpowiednie zwiększenie długości L_{PN} m-ciągów lub zwiększenie częstotliwości F_{PN} jego taktowania.

Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób zdalnego pomiaru odległości polegający na tym, że moduluje się sygnał optyczny ciągiem pseudolosowym i wysyła się w kierunku obiektu, po czym odbity sygnał odbiera się przy pomocy fotodetektora przekształcającego sygnał optyczny na elektryczny, **znamienny tym**, że sygnał z generatora pseudolosowego (103) doprowadzony do modulatora optycznego (106) opóźnia się w układzie opóźniającym (105) o czas τ_s , korzystnie czas równy jednej czwartej czasu T_C trwania jednego bitu sekwencji pseudolosowej, a sygnał elektryczny z fotodetektora (108) przetwarza się

z pomocą komparatora (109) na jednobitowy ciąg cyfrowy, który próbkuje się przerzutnikiem D (111), a następnie przemnaża się go w pierwszej bramce XOR (112) przez opóźniony o czas τ' (104) ciąg pseudolosowy z generatora PN (103) i jednocześnie przemnaża się go w drugiej bramce XOR (113) przez opóźniony o czas τ' (104) i dodatkowo o czas T_C (110) ciąg pseudolosowy z generatora PN (103), po czym wysokim stanem na wyjściu pierwszej bramki XOR (112) aktywuje się pierwszy licznik (114) i zlicza się impulsy o częstotliwości F_S z generatora VCO (117) i jednocześnie wysokim stanem na wyjściu drugiej bramki XOR (113) aktywuje się drugi licznik (115) i zlicza się impulsy o częstotliwości F_S z generatora VCO (117), a następnie liczby zliczonych impulsów w pierwszym liczniku (114) i w drugim liczniku (115) przekazuje się do nadrzędnego układu sterująco-przetwarzającego (116), korzystnie mikrokontrolera.

2. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że stosunek częstotliwości próbkowania F_S do częstotliwości F_{PN} taktowania generatora ciągu pseudolosowego (103) wyraża się ułamkowym współczynnikiem γ , którego wartość przyjmuje się z zakresu 3.995 do 31.99, korzystnie przyjmuje się wartość 15.99.

3. Sposób według zastrz. 1, **znamienny tym**, że w nadrzędnym układzie sterująco-przetwarzającym, korzystnie mikrokontrolerze, wyznacza się różnicę liczby zliczonych impulsów w drugim liczniku (115) i pierwszym liczniku (114), po czym wynik mnoży się przez współczynnik korekcyjny nachylenia funkcji autokorelacji i uzyskuje się licznik cząstkowego opóźnienia sygnału, następnie sumuje się liczbę zliczonych impulsów w pierwszym liczniku (114) i drugim liczniku (115), po czym odejmuje się wartość skorygowanej długości ciągu pseudolosowego i uzyskuje się mianownik cząstkowego opóźnienia sygnału, następnie cząstkowe opóźnienie sygnału powiększa się o numer zakresu pomiarowego, po czym całość mnoży się przez jedną czwartą długości fali modulującej i uzyskuje się odległość.

4. Urządzenie do zdalnego pomiaru odległości zawierające modulator sygnałów optycznych (106) i fotodetektor (108) przekształcający sygnał optyczny na elektryczny, **znamiennie tym**, że wyjście generatora pseudolosowego (103), korzystnie generatora ciągu maksymalnej długości, jest połączone z wejściem układu opóźniającego (105), z którego opóźniony sygnał podany jest do wejścia modulatora optycznego (106), jednocześnie wyjście układu fotodetektora (108) jest połączone do wejścia odwracającego komparatora (109), którego wyjście wprowadzone jest na wejście danych przerzutnika D (111), którego wejście zegarowe połączone jest z wyjściem generatora VCO (117), a wyjście zwarte jest z pierwszymi wejściami pierwszej (112) i drugiej (113) bramki XOR, gdzie sygnał z wyjścia pierwszej bramki XOR (112) wprowadzony jest do wejścia zezwalającego pierwszego licznika (114), a sygnał z wyjścia drugiej bramki XOR (113) wprowadzony jest do wejścia zezwalającego drugiego licznika (115), jednocześnie na wejścia zegarowe liczników (114) i (115) podany jest sygnał z wyjścia generatora VCO (117), a ich wyjścia połączone są do nadrzędnego układu sterującego (116), korzystnie mikrokontrolera, ponadto drugie wejście pierwszej bramki XOR (112) połączone jest z wyjściem układu opóźniającego (104), a drugie wejście drugiej bramki XOR (113) połączone jest z wyjściem dodatkowego układu opóźniającego (110).

Rysunki

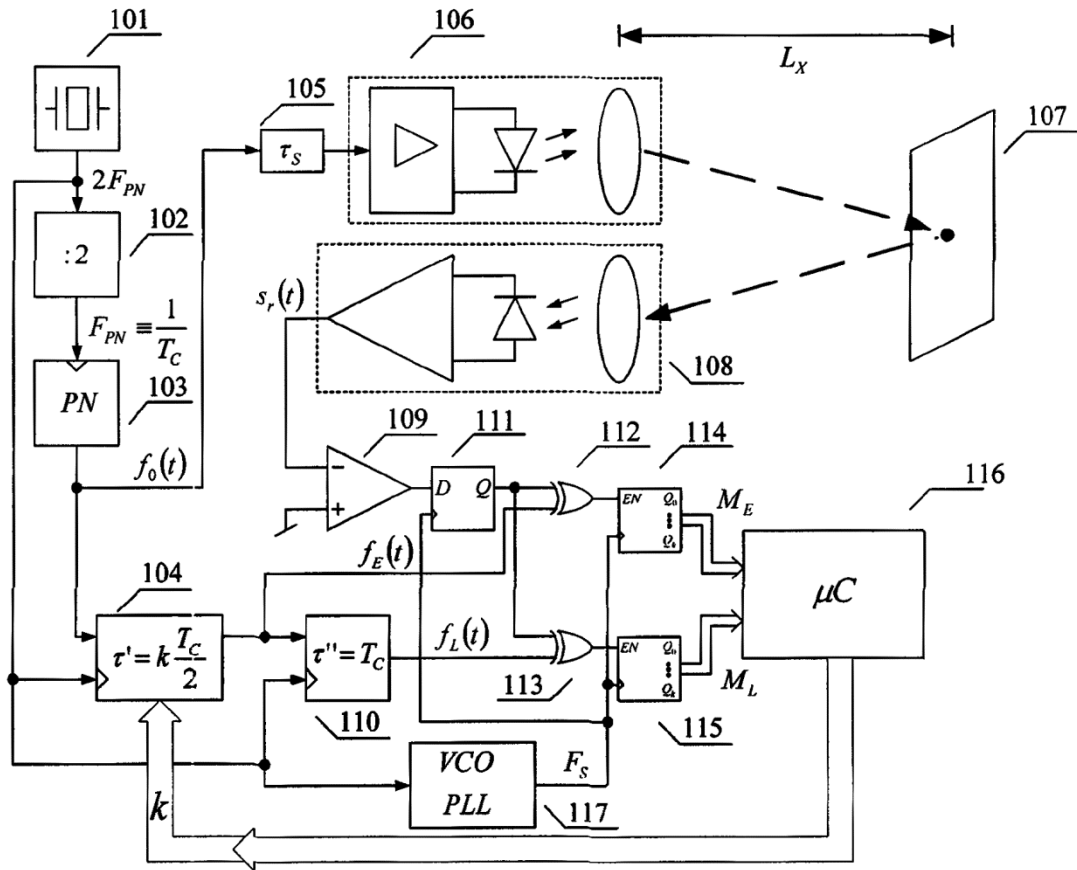


Fig. 1

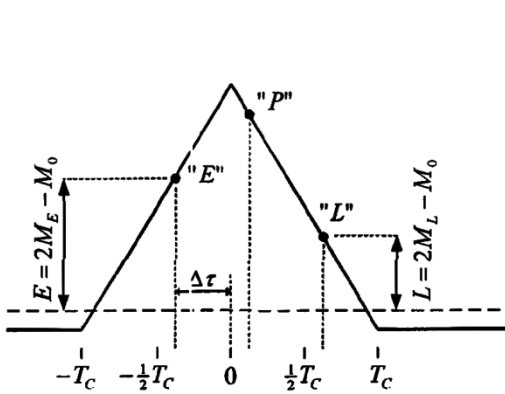


Fig. 2

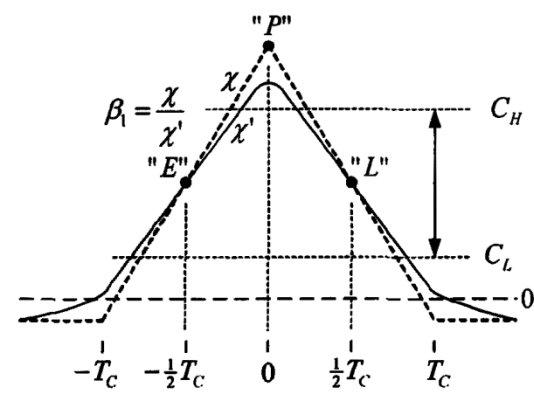


Fig. 3

