LA MISURA DIRETTA DELLA DISTANZA*

I DISTANZIOMETRI
(EDM/EODM)

* tratto da: Prof. A. Manzino, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino, http://www.mondovi.polito.it/ebook/doc/top03.pdf

La misura delle distanze con i distanziometri ad onde

- La misura delle distanze con precisioni paragonabili a quelle che da oltre un secolo sono tipiche delle misure angolari è sempre stato un problema di non facile soluzione.
- Ciò era dovuto fondamentalmente a dover attraversare il terreno morfologicamente più o meno accidentato con apparati che a causa delle precisioni richieste debbono essere abbastanza complessi.

- L’operazione di misura era lunga, laboriosa, suscettibile di errori sistematici.
- La misura avveniva spesso per via indiretta con metodi telemetrici o stadimetrici ma la precisione era ancora insoddisfacente.
- Nel 1933 il sovietico Balaicov brevettò un distanziometro ad onde ed il connazionale Lebedev nel 1938 ne costruì un prototipo.
- Nel 1943 lo svedese Bergstrand costruì il primo strumento commerciale: il «Geodimeter», con portata fino a 10 km.

Geodimeter

- Nel dopoguerra il sudafricano Wadlei inventò infine il primo distanziometro a microonde (MDM) (chiamato Tellurometer) con portata sino a 150 km e precisione $2\ 10^{-6}$ per queste portate.
- Questi strumenti erano ancora molto ingombranti, poco precisi e il metodo di misura era relativamente lento, ma il passo in avanti formidabile.

Tellurometer

- La misura elettromagnetica della distanza con distanziometri (EDM = Elettromagnetic Distance Meter) può avvenire attraverso strumenti che impiegano come onde portanti le onde luminose EODM (Elettro Optical Distance Meter) o che impiegano onde centimetriche (MDM = Micro wave Distance Meter).

EDM a misura di fase e a misura del tempo di volo

- Possiamo distinguere poi gli EDM che prevedono la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (vedi figura 11.1a) e quelli che prevedono la misura di tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda opportunamente codificata (fig. 11.1b).
- Questo secondo metodo è teoricamente più semplice ma, sino a qualche tempo fa, difficile da attuare per la scarsa precisione con la quale era possibile misurare questi brevissimi intervalli di tempo.

Il vantaggio principale è che una grande quantità di potenza, concentrata in un ristrettissimo intervallo di tempo δt, permette di superare grandi distanze (o piccole distanze senza la necessità di un prisma retro riflettore). Anche il consumo di energia è modesto.

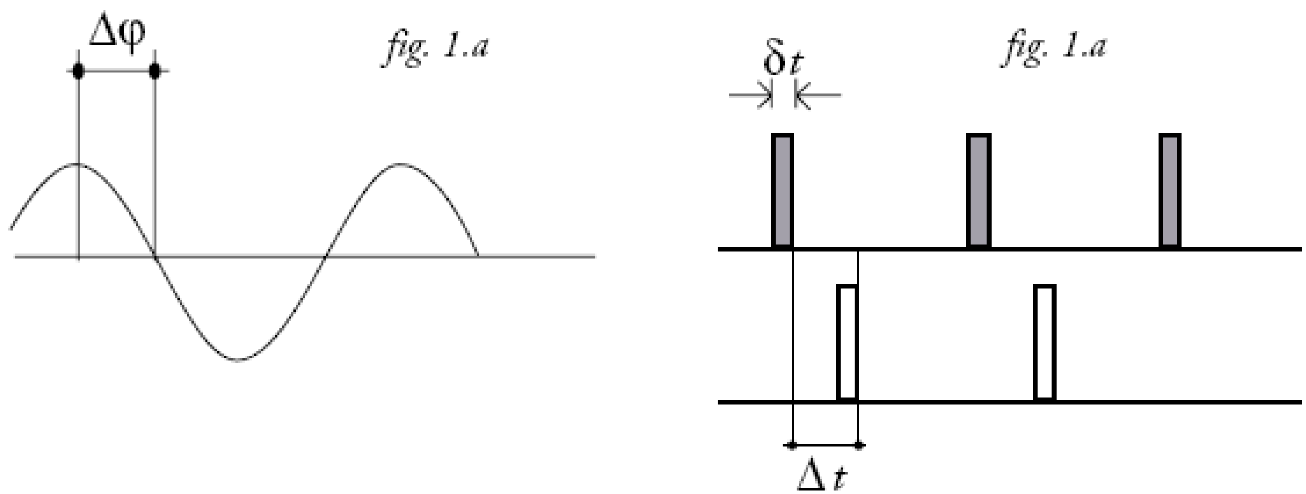

Fig. 11.1a – 11.1b – Metodi per la misura della fase o sfasamento.

- In entrambi i metodi la misura viene ripetuta in genere qualche migliaio di volte sicché è possibile ricavare lo scarto quadratico medio che, (essendo tutte le misure eseguite entro pochi secondi) non dipende in senso stretto dalle variazioni ambientali ma può considerarsi un errore accidentale.

I distanziometri elettro ottici EODM

- Questi distanziometri sono i più diffusi; il concetto di funzionamento (fig. 11.2) è quello di emettere una radiazione ottica sulla lunghezza d'onda dell'infrarosso vicino, (λ=0.78 μm) di modularla e di trasmetterla verso un prisma retro riflettore;
- quest’ultimo riflette una parte dell’onda verso la parte ricevente dell’EODM che misura la differenza di fase tra l’onda emessa e quella ricevuta.

- Questo sfasamento misurabile è funzione del doppio della distanza tra il distanziometro e il prisma.
- Nell’EODM sono dunque presenti due parti, una trasmittente ed una ricevente.
- L’esigenza di concentrare l’energia per superare grandi distanze ed avere un buon segnale di ritorno, fa sì che si utilizzino onde infrarosse coerenti (laser),
- l'esigenza di poterne discriminare la fase con precisione, suggerisce di modulare queste onde con frequenze proprie delle onde decametriche o metriche,
- infine la necessità di far ritornare buona parte del segnale dal punto di misura verso la stazione fa sì che si usino prismi particolari (e non semplici specchi).

Il metodo della misura della fase

- Da un oscillatore campione si trasmette verso *B* un'onda elettromagnetica infrarossa modulata con precisione.
- Una porzione dell'onda riflessa dal prisma posto sul punto *B* torna al ricevitore che in genere è un corpo unico col trasmettitore perché governato dallo stesso oscillatore.
- Lo sfasamento tra l'onda trasmessa e l'onda ricevuta sarà funzione di D_o.

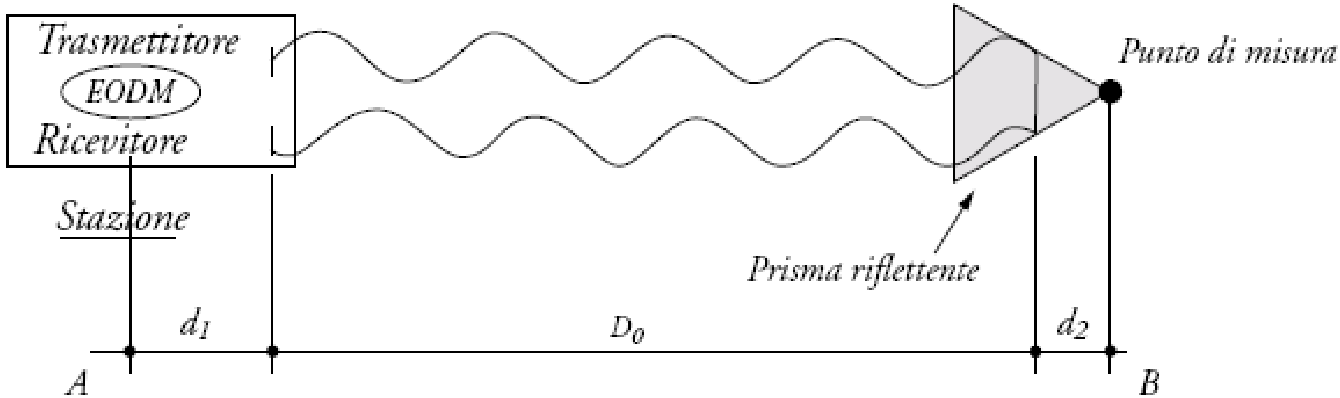

Fig. 11.2 – Principio della misura della distanza con gli EDM.

La distanza AB sarà:

$$AB = d_1 + D_0 + d_2 \tag{11.1}$$

L'onda elettromagnetica emessa è modulata in intensità I secondo la legge:

$$I = I_0 \sin\omega(t_0 + \Delta t) = I_0 \sin(\varphi_0 + \Delta\varphi) \tag{11.2}$$

dove $\omega t_0 = \varphi_0$ è la fase iniziale, $\Delta\varphi = \omega\Delta t$ è lo sfasamento ed ω è l'impulso.
In assenza di rifrazione si ha:

$$\frac{\lambda}{c} = \frac{2\pi}{\omega} \tag{11.3}$$

cioè:

$$\Delta\varphi = \omega\Delta \mathrm{t} = \frac{2\pi}{\lambda} c\,\Delta t \qquad 11.4$$

e:

$$\Delta s = c\,\Delta t = \Delta\varphi\,\frac{\lambda}{2\pi} \qquad 11.5$$

La 11.5 mette in luce le due quantità misurabili: Δt nel caso degli EDM ad impulsi, $\Delta\varphi$ nel caso degli EDM a misura di fase; da entrambe si ricava Δs.

Seguiamo per ora questo secondo cammino: essendo Δs il doppio del percorso D_0 a meno di un certo numero di lunghezze d'onda si ha:

$$2D_0 = n\lambda + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\lambda \qquad 11.6$$

cioè:

$$AB = D = n\frac{\lambda}{2} + \left(\frac{\lambda}{2}\,\frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) + d_1 + d_2$$

$$AB = D = n\frac{\lambda}{2} + \left(\frac{\lambda}{2}\,\frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) + d_1 + d_2 \qquad 11.7a$$

$$AB = D = n\frac{\lambda}{2} + L + d_1 + d_2 \qquad 11.7b$$

Il numero intero n si chiama ambiguità.

I problemi pratici di misura consistono allora nel ricavare $\Delta\varphi$ con precisione e nel determinare n con affidabilità.

Le frequenze, quindi le lunghezze d'onda generate, hanno stabilità (precisione) di $2 \div 5 \cdot 10^{-6}$, cioè di qualche ppm (parte per milione ovvero mm/km).

La frequenza emessa potrebbe avere anche stabilità superiore ma tale precisione risulta inutile se non è possibile stimare in maniera più precisa di 10^{-6} l'effetto della rifrazione atmosferica.

La misura dello sfasamento avviene con uno strumento che chiamiamo sinteticamente discriminatore di fase. Per rendere omogenee le precisioni di misura è bene che L sia misurata con incertezza minore od uguale al contributo della parte non modellabile della rifrazione atmosferica.

Considerando che i discriminatori hanno precisione $k = \pm 10^{-3}$:

$$\sigma_L = \pm \sigma_{\Delta\varphi} \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{2} = k\frac{\lambda}{2} \qquad 11.8a$$

$$\sigma_L = \pm (3 \div 5) \cdot 10^{-4} \frac{\lambda}{2} \qquad 11.8b$$

Supponendo nelle 11.7 privi di errore i termini $n\lambda/2$, d_1 e d_2 si ha che $\sigma_D = \sigma_L$ cioè volendo spingere σ_D ai valori su esposti, cioè $\sigma_D = 5 \cdot 10^{-6} D$:

$$5 \cdot 10^{-4} \frac{\lambda}{2} = 5 \cdot 10^{-6} D$$

$$\lambda = \frac{2D}{100}$$

e per distanze D di 1 km risulta $\lambda \cong 20$ m.

Precisione degli EDM

La precisione degli EDM si valuta attraverso due costanti c_0 e c_1 dette appunto costanti di precisione del distanziometro che dipendono dalla risoluzione minima di misura e dalla stabilità di frequenza rispettivamente. Le case costruttrici forniscono questi valori ricavati dopo numerosi test di laboratorio ma soprattutto da misure sul campo eseguite secondo norme standardizzate.

Si è soliti scrivere:

$$\sigma_D = \pm(c_0 + c_1 D)$$

I valori più comuni sono:

$$c_0 = 1 \div 5\text{mm}; \qquad c_1 = 1 \div 5 \cdot 10^{-6}\ (1 \div 5\text{ppm})$$

I valori migliori sono c_0=1 mm nei distanziometri che usano il metodo di misura della fase e $c_1 = 1 \cdot 10^{-6}$ negli EDM che sfruttano il metodo di misura ad impulsi. Il Mekometro fa eccezione a questa regola empirica generale.

La temperatura interna all'elettronica è rivelata da un termostato che permette di tener conto delle variazioni termiche. In alcuni casi lo strumento è dotato di un secondo termostato per rilevare la temperatura dell'ambiente esterno che può essere utile per scopi che vedremo in seguito.

La stabilità di frequenza dipende anche dall'invecchiamento del quarzo che modifica la frequenza di 1 ppm nel primo anno di vita e di circa 2 ppm in 8-10 anni.

Misura delle ambiguità n con due frequenze vicine negli EODM

Se ipotizziamo di misurare la distanza modulando l'onda infrarossa con due frequenze di lunghezza d'onda λ_1 e λ_2 prossime, in modo tale che l'ambiguità n sia uguale per entrambe le misure della distanza D, si potrà esprimere la distanza D attraverso:

$$D = n\frac{\lambda_1}{2} + L_1 = n\frac{\lambda_2}{2} + L_2 \qquad 11.9$$

dove L_1 e L_2 sono le parti frazionarie di λ cioè:

$$L_1 = \frac{\Delta\varphi_1 \lambda_1}{4\pi} \quad \text{e} \quad L_2 = \frac{\Delta\varphi_2 \lambda_2}{4\pi}$$

Entrambe le quantità sono misurabili dal discriminatore.

Si ricava allora:

$$n \cdot \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{2} = L_2 - L_1 \qquad (\lambda_2 > \lambda_1) \qquad 11.10$$

Tale ambiguità è nota con certezza sino ad una distanza D_{lim}, detta distanza limite per cui le ambiguità non sono più identiche:

$$D_{\mathrm{lim}} = n\frac{\lambda_1}{2} = (n+1)\frac{\lambda_2}{2} \qquad 11.11$$

cioè:

$$n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \qquad 11.12$$

che sostituita nella 11.11 fornisce:

$$D_{\mathrm{lim}} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} \qquad 11.13$$

Un secondo problema è l'affidabilità del valore di n ricavato dalla $\boxed{11.10:}$ il risultato di questa espressione non è un numero intero. Si accetta che differisca dall'intero di una quantità massima pari a 0.2.

Per la precisione, ipotizzando che $3\sigma_n = \pm 0.2$:

$$|\sigma_n| \leq \frac{1}{3}(0.2) = 0.067 \qquad 11.14$$

propagando la varianza nella 11.10, supponendo note con certezza λ_1 e λ_2, poniamo:

$$\sigma_{L_1} = \sigma_{L_2} = \sigma_L = \text{cost}$$

$$\sigma_n = \pm\frac{2\sqrt{2}}{\lambda_1 - \lambda_2}\,\sigma_L \qquad 11.15$$

che nell'ipotesi 11.14 risulta:

$$2\sqrt{2}\,\sigma_L\,\frac{3}{0.2} \leq (\lambda_1 - \lambda_2)$$

cioè:

$$(\lambda_1 - \lambda_2) \geq 42.4\ \sigma_L \qquad 11.16$$

Se ad esempio si assume $\sigma_L = \pm 5$ mm e $\lambda_1 = 20$ m, dalla 11.16 si ottiene $\lambda_2 = 19.788$ m e dalla $\boxed{11.11}$ $D_{\text{lim}} = 933$ m.

Misura dell'ambiguità n col metodo delle decadi

Questa misura consiste nell'utilizzo di più lunghezze d'onda multiple di un fattore 10 o 100. Si sceglie ad esempio:

$$\lambda_1 = 2000\text{m}, \ \lambda_2 = 20\text{m}.$$

Con ciò, per distanze minori di $\lambda_i/2$ si ha automaticamente $n = 0$.

Attraverso la $\boxed{11.8}$ e la $\boxed{11.9}$ si ricava lo scarto quadratico medio della distanza per ogni lunghezza d'onda utilizzata λ_1 o λ_2. Si ha, per una distanza massima D di 1 km:

$$\sigma_\lambda = \pm 0.5\text{m} \ \text{ per } \ \lambda_1 \quad \text{e} \qquad \sigma_D = \pm 0.25\text{m}$$

$$\sigma_\lambda = \pm 0.5\text{cm} \ \text{ per } \ \lambda_2 \quad \text{e} \qquad \sigma_D = \pm 2.5\text{mm}$$

Facciamo l'ipotesi di dover misurare una distanza D di 728.46m.

Con λ_2 si determina la distanza stimandola con l'affidabilità del metro, il che equivale a calcolare l'ambiguità per l'uso della successiva λ_2. La quantità L_1 della 11.7 vale, a seconda dei casi:

$$
\begin{array}{lcrll}
L' & = & 728.68 & \text{m} & \pm 0.25\,\text{m} \\
L'' & = & 8.457 & \text{m} & \pm 2.5\,\text{mm} \\
\hline
D & = & 728.46 & \text{m} &
\end{array}
$$

La misura dello sfasamento nei moderni strumenti avviene con l'accuratezza riportata nella 11.8b.

Nel Distomat DI 1001, ad esempio, che usa il metodo delle decadi, con λ_1= 4000 m si coprono distanze limite di 2000 m con affidabilità migliore di 1 m e, con λ_2 = 40 m, si ottiene la risoluzione sub centimetrica desiderata.

Misura dell'ambiguità con due frequenze prossime e la terza maggiore

È il metodo adottato ad esempio nello strumento Leica KERN DM 504 che utilizza:

λ_1= 2000 m, λ_2= 1980 m e λ_3= 20 m.

Il metodo combina i vantaggi dei due metodi precedenti in quanto con le due frequenze prossime ritrova un valore della distanza sufficientemente approssimato per il calcolo dell'ambiguità (si verifichi ciò utilizzando la 11.8); con la terza frequenza più elevata avviene la misura fine. Con l'utilizzo di λ_1 e λ_2 la distanza limite fornita dalla 11.11 risulta di 99 km, ben superiore alla portata strumentale.

In sintesi, con λ_1 e λ_2 si ottiene la misura della distanza con incertezza di 0.3 m, dopo aver ricavato il numero di ambiguità decametriche, con λ_3 si misura la distanza con incertezza di ±0.3 cm.

L’onda portante e l’onda modulante

Nella trasmissione dell'onda, l’energia dispersa dall’apparato trasmittente si distribuisce su superfici proporzionali al quadrato della distanza; è necessario che una parte dell'energia ritorni alla parte ricevente in quantità sufficiente a misurare la fase o i tempi di ritorno.

Questo si ottiene vantaggiosamente usando onde ottiche $\lambda = (0.3 \pm 1)\mu m$, più vantaggiosamente con l’uso di luce coerente (laser).

Spesso la scelta dell’infrarosso vicino ($\lambda = 0.85\mu m$) migliora il segnale di ritorno in condizioni di visibilità (del campo dell’occhio umano) non eccellenti (deboli foschie ad esempio).

Con l’uso del laser si può anche concentrare una discreta potenza in piccoli angoli solidi diminuendo così il consumo energetico dell'apparato.

Il problema è che, per discriminare fasi o misurare tempi di ritorno del segnale con precisione sufficiente, occorrono lunghezze d’onda metriche e non micrometriche. La soluzione adottata consiste nel modulare la portante ottica con lunghezze d'onda metriche o decametriche.

La modulazione del segnale ottico può avvenire in ampiezza (negli EODM), in frequenza (per le microonde degli MDM), od in polarizzazione.

La modulazione più semplice o modulazione diretta utilizza i fotodiodi all'arseniuro di gallio GaAs che hanno la proprietà di emettere una luce infrarossa ($\lambda = 0.85 \mu m$) con energia proporzionale alla corrente che li attraversa.

$$E = \mathrm{K} I \qquad 11.17$$

Questa corrente può essere variata alla frequenza corrispondente alle lunghezze d'onda metriche e decametriche necessarie alla misura delle distanze, ottenendo così un segnale luminoso modulato in ampiezza.

Nei distanziometri a laser Elio-Neon la modulazione avviene in modo indiretto, a valle del segnale ottico prodotto attraverso un oscillatore e per mezzo del fenomeno della birifrangenza.

Operazioni sulle onde ricevute e trasmesse

La misura dello sfasamento, o del tempo di ritorno dell'onda, avviene attraverso alcuni circuiti governati dallo stesso «orologio», cioè dallo stesso circuito oscillatore; ciò limita gli errori di instabilità di frequenza.

Nel caso si utilizzino stazioni totali, nel medesimo cannocchiale devono essere convogliati i segnali trasmessi e dallo stesso devono essere prelevati quelli ricevuti, ne consegue una complessità notevole di costruzione, dovuta anche all'attenzione da usare affinché i due segnali non interferiscano in alcun modo.

In nessun caso il segnale di alta frequenza (AF) viene interpretato direttamente da un discriminatore di fase ma entra prima in un circuito miscelatore-convertitore che lo trasforma in un segnale a bassa frequenza (BF) ad esempio a 6 kHz, pilotato dallo stesso quarzo orologio che genera l'onda AF.

A valle di questa conversione le vie seguite nella misura dello sfasamento possono essere due:

a. utilizzare un discriminatore «classico», costituito da un circuito trigger, da un generatore di impulsi e da un contatore di impulsi
b. trasformare il segnale da analogico a digitale con un convertitore A/D ed utilizzare a valle un contatore (questa è la soluzione più moderna).

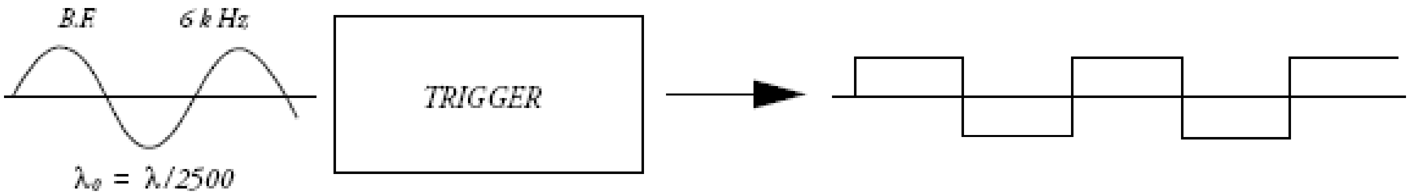

Fig. 11.3 – Campionatore ad onde quadre.

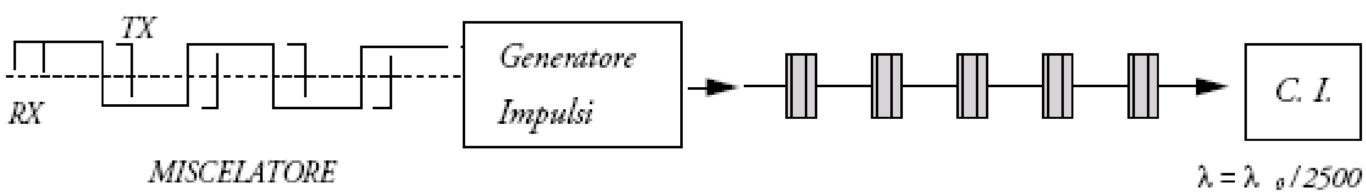

Fig. 11.4 – Misura dello sfasamento.

Nelle figure 11.3 e 11.4 osserviamo il funzionamento del discriminatore:

i segnali AF emessi e ricevuti vengono trasformati in segnali BF, attraverso un convertitore (dividendo la frequenza ad esempio per 2500), dal circuito convertitore

entrano in un circuito trigger che li trasforma in segnali ad onda quadra della stessa frequenza e dello stesso sfasamento.

Il segnale emesso attiva un generatore di impulsi ed il segnale ricevuto lo disattiva.

Il generatore emette impulsi ad alta frequenza, in genere a quella fondamentale, che nell'esempio ha lunghezza d'onda $\lambda = \lambda_0 / 2500$.

Il risultato è una serie di treni d'onda di ampiezza proporzionale allo sfasamento. Il conteggio degli impulsi contenuti in essi viene effettuato da un circuito contatore che permette così, in pochi secondi, di ricavare media e sqm di alcune migliaia di misure di sfasamento.

Il metodo b. di misura consiste nel rendere digitale il segnale BF sia dell'onda emessa che dell'onda ricevuta. Su ciascuna onda avvengono 16 campionamenti digitali trasformando i segnali che indichiamo come x_i e y_i in 16 valori numerici per ogni periodo $j = 1,\ldots,16$.

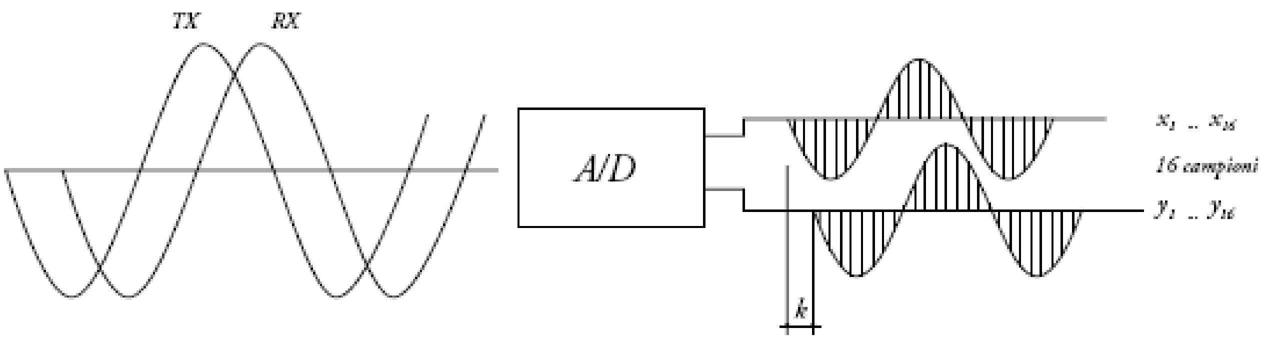

Fig. 11.5 – Trasformazione analogico-digitale e campionamento.

Vengono correlati i valori x_i e y_i cercando il valore k che rende massima a funzione

$$c = \sum x_i y(i+k) \qquad 11.18$$

Questo coefficiente viene calcolato su blocchi di misura di 32 segnali BF e mediato su vari blocchi.

Su questo principio di funzionamento si basa il distanziometro Leica Wild Di 2002 che opera con una frequenza fine $f_1 = 49.95$ MHz ($\lambda_1 = 6$ m) e con frequenze minori: 1.563 MHz, 48.17 kHz e 24.32 kHz per il calcolo dell'ambiguità.

Precisione degli EODM

La precisione di tutti gli EODM, a sfasamento, a impulsi ed anche quella degli MDM si valuta in questa forma già vista:

$$\sigma_d = \pm(c_0 + c_1 D)$$

dove c_0 è una costante che varia da 1 a 10 mm e c_1, termine moltiplicativo della distanza, va da 1 a 10 ppm per gli EODM. Ad esempio nel distanziometro DI 2002 le costanti di precisione sono:

$$\sigma_d = \pm(1\text{mm} + 1 \cdot 10^{-6} D)$$

che corrisponde alla precisione limite dei distanziometri EODM cioè attorno a $10^{-6} D$ in quanto, senza particolari accorgimenti per il controllo della rifrazione, la stabilità in frequenza del segnale ricevuto è attorno a 10^{-6}. Nel Mekometro KERN ME5000 tale stabilità arriva a 10^{-7} grazie ad un circuito risuonatore a microonde nel quale è contenuto un campione d'aria che riproduce le stesse condizioni esterne di misura.

Il Mekometro Kern ME5000

Questo strumento trova campo di impiego nella misura delle deformazioni nel controllo degli spostamenti di manufatti e per la misura di grandi distanze (sino a 15 km).

Per sfruttare tutta la precisione disponibile (10^{-7}) dovuta anche all'utilizzo di un risuonatore a microonde e poter determinare le ambiguità, le frequenze utilizzate sono ben cinque e tutte vicine.

La frequenza fondamentale è di 499.51 MHz pari a lunghezze d'onda di 60 cm; come si vede questa frequenza è circa dieci volte maggiore di quella usata per i normali distanziometri che raggiungono la precisione massima di 10^{-6}.

Le costanti strumentali sono:

$$\sigma_d = \pm(0.2\text{mm} + 0.2 \cdot 10^{-6}\text{D})$$

L'onda portante è infrarossa a laser HeNe; questa luce è polarizzata linearmente, e proprio questa polarizzazione è modulata dalle 5 frequenze.

La modulazione avviene grazie al fatto che la radiazione luminosa passa attraverso un cristallo KDP (Potassio, Deuterio, Fosforo) il quale modifica la polarizzazione della luce che lo attraversa in funzione dell'intensità di corrente che lo percorre.

Mekometer

Il metodo della misura ad impulsi

Il concetto di misura è molto semplice: nota la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica, il tempo Δt tra andata e ritorno del segnale verso il prisma è funzione della distanza:

$$D = \frac{v\,\Delta t}{2} \qquad 11.20$$

Un metodo così semplice ha tuttavia un problema: occorre, affinché la distanza D abbia precisione minima 10^{-5} che sia v che Δt siano misurabili con tali precisioni.

Nell'ipotesi approssimativa che $v = c = 2.9979 \cdot 10^{8}$ m/s, costante nota con estrema precisione, si ha che Δt deve essere preciso circa 10^{-5}, cioè la sensibilità deve essere:

$$\frac{\delta\,(\Delta t)}{\Delta t} = 10^{-5} \;\Rightarrow\; \delta(\Delta t) = 10^{-5}\Delta t \qquad 11.21$$

Per una distanza minima di misura di 3 m, il segnale ritorna dopo $\Delta t \cong 3 \cdot 2 \cdot 1/3 \cdot 10^{-8}$; $s \cong 20$ ns e la sensibilità 11.21 dovrebbe essere $10^{-5} \cdot 20$ ns $= 0.2$ ps cioè di $2 \cdot 10^{-13}$ s, ottenibile solo con orologi atomici, al Cesio ad esempio.

In realtà, accettando che tale precisione (10^{-5} o 10^{-6}) sia disponibile per distanze superiori a questa minima distanza, la sensibilità diminuisce. Dalla $\boxed{11.20}$ infatti si ricava:

$$\delta(\Delta t) = \frac{2}{v} \cdot 10^{-5}\ \delta(D) \qquad 11.22$$

Accettando le costanti del distanziometro (tipiche ad esempio del Wild Di 3000 (DIOR)):

$$\delta(D) = \pm(3\,\text{mm} + 1\,\text{ppm}) \qquad 11.23$$

per $D = 10$ km si ha $\delta_D = \pm 13$ mm e:

$$\delta(\Delta t) = \pm 0.013 \cdot 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot 10^{-8}\,\text{s} = \pm 80\,\text{ps} = \pm 8 \cdot 10^{-11}\,\text{s}$$

Nel distanziometro esiste un oscillatore molto stabile di tolleranza più limitata $\tau = \pm 3 \cdot 10^{-8}$ s a frequenza $f \cong 14.985$ MHz pari a $\lambda = 20$ m, ma è possibile in un breve intervallo di tempo valutare intervalli di tempo con precisione superiore a 10^{-8}, grazie ad un metodo di interpolazione che si descriverà in breve.

Un diodo Ga As viene attraversato per un tempo ristrettissimo: 12 ns, da una forte corrente di 20 - 30 A ed emette un fascio di luce laser. La corrente è costante e stabilizzata in questo brevissimo intervallo.

Dopo un certo intervallo di tempo Δt al ricevitore arriva il segnale di ritorno: questo intervallo di tempo consente di avere un valore approssimato della distanza con sqm pari a:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{\tau c}{2} = \pm 3 \cdot 10^{-8}\ \text{s} \cdot 3 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \cong \pm \frac{9}{2}\text{m} = 4.5\text{m}$$

Per distanze superiori l'orologio di riferimento determina in modo esatto solo in numero di lunghezze d'onda contenute nell'intervallo di tempo Δt tra il segnale emesso e quello ricevuto. Rimane allora il problema della misura «fine» della distanza.

Supponiamo che l'oscillatore di riferimento disponga di un'onda di frequenza f_0. Chiamando con T il periodo della frequenza fondamentale f, l'intervallo Δt tra l'onda impulsiva emessa e quella ricevuta sarà:

$$\Delta t = nT + t_a - t_b \quad 11.24$$

Per distanze minori di 10 m il valore di n è uguale a zero.

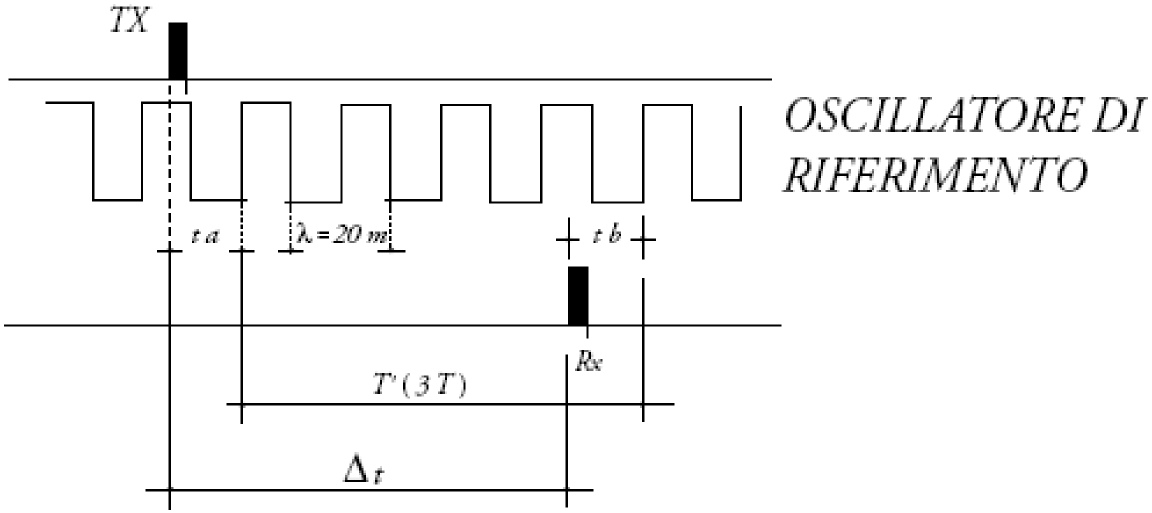

Fig. 11.6 – Metodo di invio degli «impulsi».

Il valore di n è noto in quanto misurando τ, la distanza approssimata è nota con precisione migliore del decametro.

Per misurare con precisione t_a e t_b si usa un convertitore tempo-tensione costituito in pratica da un buon condensatore la cui tensione, misurata in modo digitale, dipende dal tempo di carica in modo lineare.

Dopo ogni misura di tensione ed entro un intervallo che al massimo deve durare un ciclo, il condensatore viene scaricato. Questo condensatore viene cioè aperto dal segnale di start e chiuso dalla prima rampa del segnale dell'oscillatore.

Per la misura di t_b, essendo il segnale ricevuto molto debole, si preferisce fare la misura dopo aver modulato questo segnale con la frequenza data dallo stesso circuito di oscillazione.

Un «circuito rivelatore di zero» misura t_b come il primo zero della sinusoide smorzata che si ottiene come risultato di detta operazione.

Per poter effettuare misure di tempo così precise, non si può prescindere dai ritardi di fase dell'orologio interno dovuti ai ritardi parassiti dell'elettronica, dei circuiti interni o di altri sistematismi qui non più trascurabili: per questo motivo, oltre alla misura «esterna» del tempo, cioè del segnale di ritorno, avviene anche una misura interna, catturando, prima dell'uscita, una parte del segnale impulsivo emesso e misurandone il tempo di percorrenza nei circuiti, cioè a distanza nulla.

La misura della distanza avviene tenendo conto dei tempi di avvio di migliaia di impulsi emessi a 2000 Hz di frequenza (o centinaia in modalità tracciamento), e ciò consente di ricavare e fornire anche il numero di misure fatte e lo sqm delle stesse. Uno solo di questi impulsi permette in teoria di determinare la distanza e ciò consente di seguire agevolmente anche oggetti in movimento.

Attualmente sul mercato gli strumenti di questo tipo sono ad esempio il DI 3000 DIOR della Leica, l'ELDI 10 della Zeiss ed il modello 101 della Fennel.

I prismi

La superficie riflettente dell'onda elettromagnetica è costituita da uno o più prismi; nel caso di strumenti ad impulsi si possono usare anche speciali catarifrangenti o segnali riflettenti od infine nulla se non la superficie stessa dell'oggetto.

Il motivo dell'uso dei prismi è semplice: ridirigere la maggior parte del segnale verso l'EDM e ciò avverrebbe solo in piccola parte utilizzando specchi o altri mezzi.

Il principio di funzionamento del prisma permette infatti di ridirigere un fascio di luce parallelamente alla direzione di incidenza. Il prisma più semplice si ottiene tagliando uno spigolo di un cubo di cristallo con un piano di taglio normale alla diagonale del cubo. Il numero di prismi necessario ad assicurare una buona risposta dipende dal tipo di distanziometro e dalla distanza da misurare.

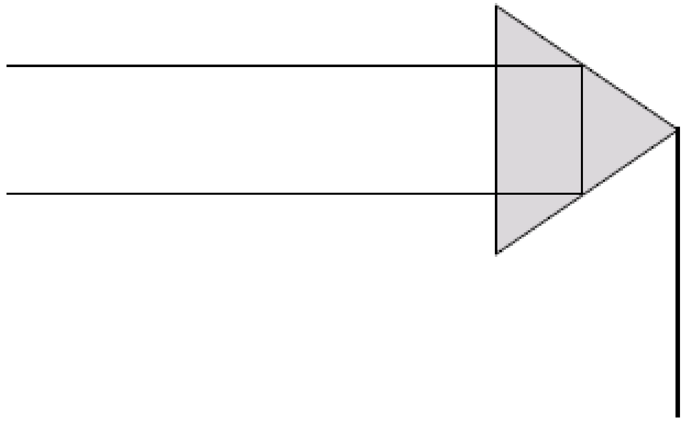

Fig. 11.7 – Schematizzazione del «riflettore passivo».

L’influenza della rifrazione atmosferica

Similmente a quanto visto per la livellazione trigonometrica, il segnale ottico emesso da un distanziometro in A segue, rispetto al percorso teorico minimo, una linea curva, inclinata di un angolo che dipende dal mezzo attraversato e dalla frequenza dell’onda. L’arco l_p è dunque il percorso dell’onda ottica che differisce dal più corto percorso della corda l.

Sperimentalmente questa differenza, anche per distanze di 50 km, è inferiore alla precisione strumentale, per cui ai nostri fini $l_p = l$.

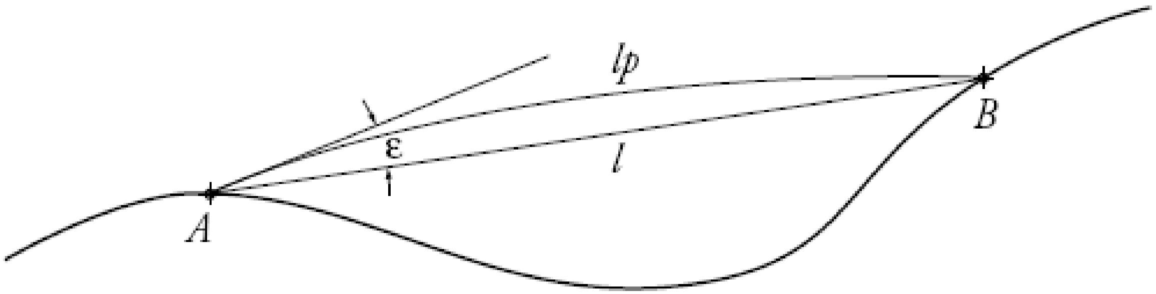

Fig. 11.9 – Differenza tra distanza percorsa l_p e distanza minima l.

In realtà durante il tragitto (l_p o l che sia) l'onda subisce un ritardo che dipende dalla velocità di gruppo, cioè dalla frequenza di modulazione, secondo la legge:

$$\lambda = \frac{c}{nf} \qquad 11.26$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto, n è l'indice di rifrazione di gruppo e f è la frequenza di modulazione.

L'indice di rifrazione dipende in genere:

- dalla composizione atmosferica (che si ipotizza costante per modesti dislivelli)
- dalla temperatura: $\Delta t = 1°$ C fa variare di 1 ppm
- dalla pressione: $\Delta p = 3.4$ mb fanno variare di 1 ppm
- dall'umidità relativa: $\Delta e = 26.6$ mbar di pressione del vapore acqueo fanno variare la distanza negli EODM di 1 ppm mentre è circa 100 volte superiore la sua influenza negli MDM.

Formula di Barrel e Sears

Non potendo conoscere questi valori lungo tutto l'arco s si usano spesso valori medi lungo AB od i valori misurati nella stazione A per correggere la distanza visualizzata, che fa riferimento a temperature, pressioni, umidità standard.

Allo scopo, si possono utilizzare apposite tabelle fornite a corredo dei distanziometri oppure ad esempio la formula di Barrel e Sears per gli EODM:

$$\frac{n-1}{n_0-1} = \frac{273.16}{273.16+t}\,\frac{p}{1013.25} - \frac{11.27 \cdot 10^{-6}}{273.16+t}\,e \qquad 11.27$$

ove p ed e sono espresse in mb e t in gradi centigradi.

1970's AGA Geodimeter

Prismi