

Gli apparati interferometrici per il tracking (*)

A. GENNARO

Ricevuto il 19 Febbraio 1963

Problemi sempre nuovi si pongono nell'esercizio di un Poligono missilistico a causa dell'aumento della velocità dei missili, dell'aumento delle gittate, del perfezionamento dei sistemi di guida con conseguente aumento delle precisioni richieste alla strumentazione, della sempre crescente necessità di ottenere i risultati del lancio in tempo reale, delle esigenze dell'addestramento dei reparti e così via.

Prestazioni tecnicamente sempre più esigenti si richiedono alla strumentazione per tenersi aggiornata con le necessità: fino ad un certo punto la tecnica si è spinta su due vie parallele ed altrettanto redditizie; il perfezionamento dei sistemi ottici ed il potenziamento dei pulse-radar.

Specialmente in quest'ultimo campo si è così arrivati a radar con prestazioni veramente eccezionali come l'FPS/16 della R.C.A. ed altri con caratteristiche similari.

Però il costo sempre crescente di tali apparati, la necessità di arrivare a direttività di fascio oltremodo spinte per poter migliorare la precisione del sistema, la sempre minore superficie equivalente dei bersagli, la impossibilità di funzionare in presenza di contromisure, ma, specialmente, la limitazione insita nel sistema di poter seguire un solo bersaglio alla volta, hanno posto in evidenza che la tecnica del pulse-radar ha pressoché raggiunto i massimi limiti consentiti.

D'altro canto i sistemi ottici, con i quali si possono ottenere importanti prestazioni specialmente sull'assetto del bersaglio e sono insensibili alle contromisure, hanno limitazioni di impiego evidenti se si pensi, per esempio, alle questioni di visibilità, ai problemi di acquisizione e così via.

Da ciò l'esigenza dell'impiego di tecniche nuove.

(*) Nota presentata al 2° Congresso Internazionale Tecnico Scientifico dello Spazio. Roma, 19-23 Giugno 1962.

I radar Doppler (e meglio ancora i pulse-Doppler) sembrerebbero risolvere molti dei nuovi problemi che si pongono, tuttavia essi hanno in sé molte limitazioni quali ad esempio una vasta zona di Doppler zero attorno al trasverso, un campo operativo di velocità piuttosto limitato per cui è azzardato esprimere un giudizio specialmente a causa della limitata esperienza di impiego sui campi di tiro.

La tecnica della comparazione di fase ha, viceversa, originato una serie di apparecchiature che, con un termine non perfettamente ortodosso, vengono definite « interferometriche » le quali per la semplicità di concezione, il costo abbastanza ridotto e, specialmente, per le prestazioni ottenibili, la elasticità d'impiego e la insensibilità alle contromisure sembrano, non a torto, in America i mezzi più idonei per le necessità delle prove missilistiche.

Le apparecchiature più conosciute in questo campo sono l'AZUSA della Convair (che può essere considerato il capostipite della serie), il SECOR, il COTAR e derivati della CUBIC, il MISTRAL della General Electric ed altri di minore importanza.

Non intendo in questa sede fare un confronto tra questi sistemi. Tuttavia mi è necessario fare riferimento ai sistemi CUBIC perché, oltre ad essere quelli più usati negli U.S.A., essi rappresentano la famiglia più completa, sono costruiti anche in Italia e sono in corso di adozione nel Poligono di Salto di Quirra, in Sardegna.

I sistemi interferometrici si articolano principalmente su due elementi fondamentali:

a) un apparato misuratore di distanza (DME) che utilizza il tempo di transito da un trasmettitore a terra ad un ripetitore a bordo e viceversa, per determinare lo « slant range ».

b) un apparato misuratore di angoli (AME) che sfrutta la differenza di tempo con cui un segnale emesso da bordo arriva a terra ad una coppia di antenne, opportunamente distanziate, allo scopo di determinare i coseni direttori della linea di sito della provenienza del segnale stesso.

In ambedue i casi, la tecnica della misura è quella del confronto di fase.

Essa si estrinseca nella ben nota relazione che lega una lunghezza con la frequenza e l'angolo di fase di un fenomeno ondulatorio; relazione che, supposto conosciuto il valore della velocità di propagazione, si esprime con la formula

$$D = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda$$

ove D è una lunghezza, λ la lunghezza d'onda del fenomeno ondulatorio e φ il suo angolo di fase.

Esaminiamo ora il principio di funzionamento del DME.

Un trasmettitore emette una frequenza portante f_1 , opportunamente modulata da una frequenza f_2 ; un apparato di bordo, ricevendo le emissioni da terra, ritrasmette la frequenza f_2 , come modulazione di una portante f_3 , ma, e questo è essenziale, ne mantiene invariata la fase.

In tale maniera, prescindendo dalle portanti, possiamo schematizzare il funzionamento riferendoci alla sola frequenza f_2 .

La distanza D tra la stazione a terra ed il trasponditore è evidentemente

$$D = \frac{1}{2} \frac{\Phi}{2\pi} \lambda - \frac{1}{2} \frac{n + \varphi}{2\pi} \lambda$$

Mentre n rappresenta il numero delle ambiguità, è evidente che l'accuratezza nella misura di φ rappresenta la accuratezza nella misura della distanza D .

Immaginiamo di impiegare per f_2 una frequenza avente una lunghezza d'onda di 2.000 piedi; poiché, anche con fasometri elettromeccanici, non vi è difficoltà a leggere il grado (ed il mezzo grado) di fase, è evidente che l'accuratezza nella misura della distanza oscilla tra 1,5 e 3 piedi circa.

Rimangono le ambiguità.

Se contemporaneamente alla frequenza f_2 , usiamo altre frequenze esattamente sottomultiple di quest'ultima, il numero di ambiguità sarà, per ogni nuova modulante, K volte inferiore a quelle di f_2 , essendo K il rapporto fra f_2 e le singole frequenze. Sono elencati alcuni esempi di combinazioni di frequenza più comunemente usate per eliminare le ambiguità.

Naturalmente l'accuratezza sarà K volte minore per cui è logico affermare che alla frequenza maggiore è affidato il compito di effettuare la misura « molto precisa », mentre alle altre si chiede solo di eliminare le ambiguità man mano che la distanza cresce, e le misure relative sono da considerarsi, rispettivamente, come « precisa » « media » « grossolana » e « molto grossolana ».

Per determinare la posizione di un punto nello spazio occorrono almeno tre distanze, per cui la combinazione di almeno 3 stazioni DME forma il sistema SECOR, naturalmente in unione con il trasponditore di bordo.

Allo scopo di non complicare gli apparati è opportuno usare per tutte le stazioni DME del sistema le stesse frequenze, sia portanti che

di misura; è evidente perciò che i cicli di misura (interrogazione e risposta) di ogni stazione della catena dovranno essere distinti fra loro per cui il tempo di lavoro di ogni stazione sarà limitato, discontinuo e sequenziato.

Una qualsiasi stazione della catena assume il ruolo di Master e dispone di un codificatore di tempo in base al quale viene ordinata, via trasponder, la sequenza ciclica di interrogazione di tutte le stazioni del sistema.

Ogni stazione però è completamente autonoma per quanto riguarda la misura per cui è pensabile che, per voli fuori dalla portata di un gruppo di stazioni, la catena possa essere prolungata passando man mano la funzione di Master.

Se la posizione di tutte le stazioni del sistema è conosciuta con la necessaria precisione rispetto ad una terna di assi cartesiani, le coordinate del trasponditore sono esattamente determinabili con una operazione matematica, che, nella più semplice espressione consiste nella risoluzione del sistema di tre equazioni della sfera.

È ovvio che se vengono impiegate contemporaneamente N stazioni DME, si avranno tanti sistemi quante sono le combinazioni di N equazioni a tre a tre; se ne possono dedurre le conseguenze di precisione ottenibili con il metodo dei valori quadratici medi.

Sempre sul principio del confronto di fase funziona l'altro apparato, l'AME.

Il segnale di una sorgente S , distante R dal centro della linea di base L di due antenne segue due percorsi generalmente diversi tra loro per cui fra le due antenne esiste una differenza di fase proporzionale alla differenza dei percorsi.

Se osserviamo, come è nella realtà, che R è molto maggiore di L possiamo considerare $\alpha = 90^\circ$, ossia, esprimendoci in termini di lunghezza d'onda e di angolo di fase risulterà

$$D = a - b = \frac{a}{2\pi} \lambda = K\lambda \cos \theta$$

ove K è la misura della linea di base in lunghezza d'onda e φ è il solito angolo di fase.

Poniamo l'attenzione sugli ultimi due termini della eguaglianza

$$\varphi = 2\pi K \cos \theta$$

in cui è definito un rapporto tra la misura della differenza di fase fra le antenne ed il $\cos \theta$.

È evidente che ogni qualvolta il coseno, nel suo campo di variabilità da 0 a 1, assume il valore di un sottomultiplo di K , il valore di φ diventa

eguale ad un multiplo di 2π , cioè zero. Abbiamo perciò $2K$ ambiguità nel campo da 0 a 180° .

È evidente che nell'intervallo tra due ambiguità, φ assume tutti i valori tra 0 e 2π ; perciò se immaginiamo di avere un K di 50 (cioè antenne distanti 50λ) la variazione del coseno che produce un ciclo completo di φ , è di 0,02.

Se, come visto per il DME, noi riusciamo a misurare il grado (ed il mezzo grado) di fase, l'accuratezza nella misura di $\cos\theta$ oscilla fra 27,5 e 55 p.p.m.:

Se la linea di base è di 128λ , l'accuratezza è fra 10 e 20 p.p.m.

Si noti che in pratica questi risultati sono ottenibili con normali fasometri elettromeccanici.

Dobbiamo eliminare le $2K$ ambiguità.

Impiegando sulla stessa linea di base diverse coppie di antenne, con K decrescenti, è evidente che le ambiguità saranno sempre meno fino a sparire per $K = \frac{1}{2}$, cioè per una coppia di antenne distanti mezza lunghezza d'onda.

Similmente per quanto fatto per il DME, possiamo considerare « molto precisa » la misura fatta con la coppia di antenne avente la base maggiore e, via via, « precisa », « media » e « grossolana » quella fatta con le coppie di antenne a base ravvicinata, le quali hanno il compito principale di eliminare le ambiguità.

Abbiamo quindi stabilito uno strumento capace di misurare, con estrema precisione, il coseno dell'angolo che la direzione di provenienza dei segnali forma con la linea di base delle antenne.

È noto dalla geometria che il luogo dei punti per i quali è costante la differenza tra le distanze da due punti noti, costituisce un iperboloide di rotazione.

Nel nostro caso per ogni valore di φ viene determinato un iperboloide, che possiamo confondere con il cono asintottico, avente il vertice sulla mezzzeria della linea di base, l'asse lungo l'allineamento delle antenne e la semiapertura θ , ormai biunivocamente determinata dalla misura di φ .

La linea di sito cercata è una generatrice del cono.

È di fondamentale importanza notare che il $\cos\theta$ è il vero coseno direttore della linea di sito rispetto alla linea di base e non, come mi è capitato di leggere qualche volta anche in documenti tecnici ufficiali, l'angolo fra la base delle antenne e la proiezione della linea di sito sul piano verticale passante per la prima.

Una interpretazione del genere oltre ad essere inesatta dal punto di vista matematico è assolutamente errata dal punto di vista fisico,

per cui, se fosse vera, tutta la filosofia del funzionamento del sistema sarebbe impossibile.

Due AME, cioè due allineamenti di antenne, perfettamente uguali ed ortogonali fra loro, definiscono due coni la cui intersezione è finalmente la linea di sito cercata.

Si noti ancora che l'apparato COTAR (così viene chiamata la combinazione di due AME) non fornisce, come i radar, il valore degli angoli, ma direttamente il valore dei coseni direttori della linea di sito rispetto ad una terna cartesiana di cui gli allineamenti delle antenne sono gli assi x ed y mentre la z è normale al piano delle antenne.

Si può vedere come si presenta in realtà il piano di antenne COTAR.

La combinazione di 2 COTAR posti a notevole distanza fra loro forma quello che si definisce sistema BICOTAR.

È evidente che la conoscenza esatta della posizione dei due COTAR e la misura di quattro coseni direttori, consentono di ricavare in modo corretto le coordinate del bersaglio con formula che tutti conoscono.

Un'altra combinazione interessante è quella di un DME e di un COTAR per originare il sistema DME-COTAR. Esso esegue il tracking fornendo, per il calcolo delle coordinate del bersaglio, una distanza e due coseni direttori.

Ci avviciniamo evidentemente al tipo di tracking che si effettua con i radar (2 dati angolari e uno di distanza), ma (e mi preme molto osservarlo) il calcolo numerico è molto più semplice, infatti non occorrono le trasformazioni dei dati di uscita degli angoli in funzione trigonometriche perché gli interferometrici forniscono, per la loro natura, direttamente i coseni.

I sistemi che abbiamo esaminato (SECOR-BICOTAR-DMECOTAR) sono le più semplici combinazioni possibili tra i due apparati base (DME ed AME) e sono idonei per il tracking di un bersaglio, cioè ognuno di essi è paragonabile ad un radar.

Però (e qui è uno dei pregi fondamentali di questi apparati rispetto ai radar) i sistemi interferometrici per la loro stessa filosofia di funzionamento e per la loro costruzione, possono facilmente eseguire il tracking di molti bersagli contemporaneamente senza bisogno di essere multiplati, come nel caso dei radar.

Ritengo necessario, prima di esaminare questi apparati che diremo « multipli », richiamare l'attenzione sull'importanza di questa flessibilità di impiego.

Prendiamo ad esempio i casi in cui lo scopo del tracking è proprio quello di determinare la posizione reciproca di parecchi mobili in volo

(es.: lancio di missili aria-aria, controllo del traffico aereo attorno ad un aeroposto, sicurezza del poligono, ecc.) od anche quando si debbono affrontare problemi di simulazione (es. la distanza di fuga di un aereo rispetto al fronte d'urto di una esplosione atomica o la posizione reciproca di due bersagli pilotati nel caso di addestramento, ecc.).

Innanzitutto è evidente l'economia nel costo dell'installazione; infatti mentre un radar può seguire un solo bersaglio e per N bersagli occorrono N radar, con l'impiego di apparecchiature interferometriche basta un solo sistema con alcuni componenti raddoppiati.

Se prendiamo poi in considerazione i problemi di acquisizione o, ancora più importanti, quelli della riacquisizione quando per cause varie il bersaglio viene perduto, l'economia è ancora più evidente.

Oggi i radar-tracking sono generalmente asserviti a sistemi ottici o a radar di ricerca o a sistemi di antenne autopuntanti, comunque è buona regola prevedere una doppia copertura dello spazio interessato, mentre con un solo sistema interferometrico multiplo l'inseguimento è comunque sempre assicurato.

Mediante per un Poligono avente una gittata dai 60 ai 100 km, quando operino 3 bersagli (intercettore, missile e velivolo bersaglio) sono necessari almeno 10 radar contro un solo sistema MATTS.

Si noti, per inciso, che l'uso dei radar e relativi asservimenti comporta l'impiego di una massa di personale specializzato che è completamente inutile negli apparati interferometrici; e questo mi sembra un altro vantaggio rimarchevole.

Ma vi è ancora una osservazione tecnica, che riguarda la precisione e che sfugge alla prima osservazione superficiale.

Abbiamo premesso che lo scopo principale del tracking è quello di rilevare contemporaneamente le traiettorie di vari bersagli per dedurne il comportamento reciproco, verificandosi determinati eventi.

Mi sembra perciò che rilevare ogni singola traiettoria con mezzi diversi, una dall'altra, poi confrontarle, avendo come unico parametro coordinatore il tempo, dia, a causa della diversità degli errori propri dei vari mezzi di rilevamento, risultati molto più imprecisi di quelli che si possono ottenere se il sistema di tracking è unico per tutti i bersagli e gli errori, prevedibili e imprevedibili, sono uguali per tutti.

Inoltre con il rilevamento radarico ad un bersaglio per volta è assolutamente necessario (a meno di non mettere tutti i radar coincidenti) effettuare tutti i calcoli di parallasse prima del confronto delle traiettorie; questi calcoli vengono aboliti con il sistema di rilevamento multiplo, ove le traiettorie sono già riferite ad un unico sistema di coordinate.

Trascuro altri vantaggi, che pure sarebbero da considerare, come: minore quantità di frequenze in gioco, riduzione di cause di avaria, ecc.

L'idea che i sistemi interferometrici inseguono vari bersagli contemporaneamente è talmente generalizzata, che oggi negli U.S.A., in Francia, in Svezia ed anche da noi quasi non si prende più in considerazione il loro impiego come sistemi ad un bersaglio.

Per rendere un DME ed un AME capaci di inseguire due o più bersagli sono impiegate due tecniche diverse: il così detto « Frequency Sharing » ed il cosiddetto « Time Sharing ».

Con il primo, adottato necessariamente nei sistemi BICOTAR, gli emettitori di bordo funzionano con frequenze leggermente diverse fra loro.

È evidente che basterà disporre, per ogni coppia di antenne, di tanti ricevitori e di tanti fasometri quanti sono i bersagli, per avere i coseni direttori di ognuno di essi, esattamente nello stesso tempo e con gli stessi errori, e perciò già idonei ad essere impiegati per un controllo delle traiettorie e delle posizioni reciproche in volo.

Si ha però l'inconveniente che la distanza tra le antenne è un multiplo intero di lunghezza d'onda della sola frequenza fondamentale f_o , cioè di quella emessa da un bersaglio.

Per la corretta valutazione dei coseni direttori di tutti gli altri bersagli occorre un fattore di correzione, per cui

$$\cos \theta_o = \frac{f_o}{f_i} \cos \theta_m = \frac{f_o}{f_o + \Delta f_a + \Delta f_i} \cos \theta_m$$

ove

$\cos \theta_o$ è il coseno cercato

$\cos \theta_m$ è il coseno misurato

f_o è la frequenza fondamentale del sistema di antenne

f_i è la frequenza impiegata

Δf_a è la differenza conosciuta tra la frequenza fondamentale e quella impiegata

Δf_i è la deviazione misurata delle frequenze dal valore nominale.

È superfluo segnalare come nel termine Δf_i sia compreso, e quindi misurabile, anche l'eventuale effetto Doppler.

La tecnica « Frequency Sharing » consente, per ragioni tecniche, l'estensione del DME a due soli bersagli; si preferisce perciò adottare per il SECOR e per il DMECOTAR la tecnica del « Time Sharing ».

Sfruttando la discontinuità di funzionamento delle stazioni DME e la loro sequenza ciclica si ottiene il funzionamento multiplo imponendo una seconda sequenza per cui i trasponditori di bordo, rispondono ciclicamente a tutte le stazioni di terra che li interrogano ciclicamente.

È evidente che la frequenza di interrogazione e quella di risposta possono rimanere le stesse e non occorre moltiplicarle, per cui in ogni stazione è sufficiente disporre di un solo ricevitore, come nei sistemi per un solo bersaglio, ma occorreranno tanti fasometri quanti sono i bersagli e l'imput dei fasometri dovrà essere comandato dal dispositivo di sequenza.

Nascono così i sistemi interferometrici più noti: MIDAS, il MATTS il MOPTAR, ecc. capaci di inseguire fino a 3-4 e più bersagli.

Ad Atlantic City è in funzione un MOPTAR per un controllo del traffico aereo per conto del Centro Sperimentale Nazionale delle Apparecchiature di Assistenza al Volo (NAFEC) della Federal Aviation Agency (FAA) attrezzato per 5, ma capace di oltre 200 aerei (e si pensa di arrivare a 400).

Il SECOR ed il MOPTAR hanno tuttavia l'inconveniente di esigere a bordo un trasponditore che può creare difficoltà di installazione su veicoli molto piccoli; viceversa il COTAR, il MIDAS ed il MATTS possono inseguire il bersaglio solo che esso disponga a bordo di una emittente qualsiasi; per questa ragione essi vengono generalmente costruiti per funzionare nella banda $225 \div 260$ MHz., non importa se e come modulati, che come è noto è la banda usata per le telemisure.

Il MATTS, che è stato omologato dalle forze armate Americane con la sigla AN/GSQ-29, non è che la evoluzione più moderna del MIDAS in quanto quest'ultimo si limita a fornire in forma analogica i coseni direttori del rilevamento di due o tre bersagli e calcolare, in tempo reale ma sempre in forma analogica, i vettori « Miss distance » (cioè distanza tra il missile e il bersaglio) ed « escape distance » (cioè distanza tra il missile e l'aereo intercettatore).

Nel MATTS le uscite sono state completamente digitalizzate per cui si raggiunge una migliore precisione. I dati sono immediatamente inseribili in una calcolatrice digitale per tutte le manipolazioni matematiche necessarie per ottenere (sempre che la calcolatrice abbia adeguate possibilità) tutti i parametri che si desiderano (traiettoria, distanze relative, velocità, accelerazioni, previsione di punto di impatto, controllo della sicurezza, ecc.).

Basta esaminare uno schema a blocchi per sincerarsi che la disponibilità in tempo reale di tutta questa massa di dati, consente di effettuare qualsiasi operazione di tracciamento di traiettorie su appositi tavoli, telepuntamento di cinetodoliti radar e cinetelescopi, comandi e ordini qualsiasi (es. lancio automatico del missile quando il bersaglio è in un certo punto della rotta, ordine ad un satellite di emettere informazioni in determinati punti dell'orbita e così via).

L'uso di fasometri digitali, nei quali lo sfasamento fra l'onda in ingresso ed il segnale di riferimento viene misurato in cifra binaria di 2^{10} , in modo che un ciclo risulta diviso in 1024 parti, consente di affermare che non è assolutamente assurdo pretendere da questi apparati le precisioni di 1 piede, nella misura della distanza e di 10 parti per un milione, nella misura del coseno.

La tecnologia costruttiva di questi apparati non è nulla di trascendentale, ma negli schemi sono evidenti l'impiego abbondante di tecniche avanzate di feedback, regolazioni accurate di circuiti critici, precisione nella costruzione meccanica e accuratissima scelta delle componenti.

Oggi poi si va sviluppando in modo particolare la tecnica dei ricevitori correlati e coerenti l'uso dei quali permette di sfruttare un'altra singolarità di questi sistemi: la indipendenza teorica della precisione delle grandezze dal valore assoluto delle grandezze stesse; è quindi possibile concepire di utilizzare, senza alcuna modifica o particolari accorgimenti, gli apparati interferometrici in campi di portata che non hanno confronti con nessun altro mezzo conosciuto.

Un esperimento pratico effettuato con un aereo a bordo del quale erano state installate due antenne distanti di 4,70 mt, ha dato come risultato che il massimo errore compiuto, nella misura dell'intervallo fra le 2 antenne, è stato di 280 mm mentre il velivolo si trovava a circa 20 km di distanza.

Per quanto la sua frequenza fosse tenuta segreta e quindi i filtri necessari preparati solo all'ultimo momento, la capsula spaziale di Glenn è stata rilevata ed inseguita con un sistema MATTS installato a Tyndall AFB in Florida. Si notino gli errori assoluti lungo i 3 assi cartesiani che sono molto piccoli se si considera la piccola base tra le stazioni.

La geometria del volo e del piazzamento delle stazioni a terra è un fattore determinante per l'accuratezza dei rilevamenti con i sistemi interferometrici.

Quando è possibile conoscere a priori l'altezza e la rotta che presumibilmente farà il bersaglio, è abbastanza facile determinare quale deve essere la ubicazione delle stazioni a terra per ottenere la precisione desiderata; tuttavia considerazioni pratiche di accessibilità dei punti scelti o di costo (come nel caso dei campi d'antenna del COTAR) impediscono di avere sempre la dislocazione ideale.

Sono stati effettuati numerosi studi in questo campo anche per ovviare ad altri inconvenienti come le riflessioni dovute a terreni non piani e per eliminare la degradazione dei risultati ai bassi angoli.

Per siti ideali, con antenne onni-direzionali, si possono avere errori nella misura della fase di 1° o 2° , mentre nelle peggiori condizioni di installazione questo errore di fase sale fino a 10° e 20° . Questo fa decrescere notevolmente l'accuratezza fino a 50 p.p.m. con antenne distanziate di 50 lunghezze d'onda. Si è sentita perciò la necessità di fare i campi d'antenne di 256λ per cui anche nelle peggiori condizioni l'accuratezza rimane compresa nella desiderata misura di 10 p.p.m.

Per i bassi angoli, specialmente sulla riva del mare, hanno dato ottimi risultati l'uso di campi di antenna inclinati sull'orizzonte per diminuire la degradazione geometrica della precisione.

Per terreni ondulati, come la maggior parte in Italia, si è dimostrata utile l'adozione di antenne direttive, del tipo « fan-beam », con angolo di apertura verticale abbastanza piccolo per evitare i multi path e angolo azimutale sufficientemente grande per non incorrere in problemi di acquisizione.

In Italia ed altrove, questi sistemi interferometrici hanno avuto ed hanno tuttora molti oppositori. La maggior parte di essi, forse per tradizione, ha voluto contrapporre a questa tecnica, nuova ed ancora piena dei problemi che accompagnano tutte le cose nuove, la più sperimentata e collaudata tecnica radaristica.

Uno degli argomenti più forti che si è cercato di opporre all'adozione di questi sistemi è stato quello dell'affidabilità.

Dal 23 Ottobre al 3 Novembre del 1961 si sono svolte sulla Base Aerea di Tyndall le gare nazionali di tiro aria-aria tra i Reparti dell'U.S.A.F. dotati di missile Genio.

Durante questi lanci (e mi affido alle sole cifre Ufficiali) furono effettuate 38 missioni delle quali 31 valide agli effetti della valutazione del tiro; di quelle annullate una sola fu per ambiguità nei dati del MATTS, tutte le altre furono invalidate per altre cause. E per queste prove il MATTS ebbe a funzionare per 157 ore contro le 152 preventivate con una percentuale operativa del 100%.

Sul poligono della Navy di Point-Arguello in California nel periodo dal 13 Ottobre 1960 al 13 Luglio 1961 il sistema COTAR, installato per la sicurezza del Poligono, ha partecipato a 138 operazioni, sotto il controllo della Federal Electric Corporation, con una affidabilità del 97,1%.

Concludo con un confronto che ritengo necessario tra l'impiego degli apparati interferometrici e dei radar-pulse per l'uso di tracking.

Esaminiamo i principali parametri che influiscono sulla scelta del sistema da impiegare: accuratezza del rilevamento, affidabilità del siste-

ma, portata e problemi di acquisizione, apparati di bordo, semplicità operativa, schemi di calcolo, costo.

Abbiamo sfiorato alcuni di questi parametri ma vorrei richiamare l'attenzione su alcune considerazioni particolari.

Circa l'accuratezza abbiamo visto che gli interferometrici sono notevolmente più precisi dei radar; però, si dice, essi hanno una degradazione per bassi angoli per cui se ne sconsiglia l'impiego per determinati tracking a bassa quota. Ora, a prescindere dalle precauzioni che si possono prendere per eliminare questo inconveniente, quale radar non ha degradazioni notevoli per angoli al disotto dei 4° - 5° ? Se poi si considera che, in pratica, l'accuratezza media nella determinazione della posizione è dell'ordine di grandezza di 5 piedi per gli interferometrici, di $25 \div 50$ piedi per i radar della classe FPS/16 e di 150 piedi per radar come l'MPQ 12, l'MPQ 18, l'MSG 1, è lecito affermare che i primi si possono permettere il lusso di una degradazione 10 volte superiore a quella dei radar, senza intaccare il loro diritto ad essere messi a confronto.

Ho già fornito alcune informazioni pratiche sulla affidabilità dei sistemi, ma vorrei osservare che essi, non avendo, come i radar, organi meccanici in movimento ed essendo concettualmente più semplici non possono essere di scarsa affidabilità, naturalmente purché siano costruiti con una certa accuratezza.

Per ottenere alte precisioni nei radar è necessario ridurre al minimo le dimensioni trasversali del fascio per cui si arriva a veri e propri pennelli lineiformi tenuti puntati sul bersaglio da servomeccanismi comandati da tensioni errore.

Questo però va a scapito dell'acquisizione iniziale e della riacquisizione nel caso (abbastanza frequente) di sganciamento del bersaglio per molteplici ragioni. Per evitare questo inconveniente si deve fare forzatamente uso di sistemi ausiliari di puntamento (radar di sorveglianza, colonnine ottiche, antenne autopuntanti, ecc.) e si deve assicurare la copertura della zona interessata con almeno due radar tracking.

Nei sistemi interferometrici non è viceversa necessario puntare l'antenna sul bersaglio in quanto essi funzionano solo e proprio perché il bersaglio è in zona ed emette. È perciò evidente che, essendo sistemi «cooperatori» che hanno bisogno di una emissione da bordo, l'acquisizione viene ricondotta nei limiti di un problema di propagazione.

Rimane eventualmente la portata.

Essa negli interferometrici è unicamente legata alla potenza del trasmettitore di bordo ed alla sensibilità dei ricevitori; agendo specialmente su questi ultimi e usando la tecnica della portante coerente e della

correlazione di fase si possono ottenere portate di centinaia di miglia con minime potenze a bordo.

Comunque è evidente dalla filosofia dei sistemi che non vi è questione di portate nel funzionamento del COTAR; eventualmente vi potrà essere una questione di ambiguità nel SECOR, quando la distanza superi la lunghezza d'onda della misura grossolana, ma mi sembra che l'errore sia talmente grande da essere riconoscibile con il solo buon senso.

La portata dei radar è viceversa limitata dagli asservimenti di distanza e dalle potenze d'eco disponibili; soltanto modifiche sostanziali possono eliminare la prima limitazione mentre potenze gigantesche, antenne ciclopiche per concentrare sempre più il fascio, rinforzatori di eco e trasponditori, sono necessari per aumentare i livelli dell'eco.

L'uso dei trasponditori a microonde per i radar pone anche dei problemi di « package » a bordo. Infatti essi hanno dimensioni strettamente obbligate dall'uso delle guide d'onda, hanno antenne ingombranti, richiedono un assorbimento di energia abbastanza grande ed hanno pesi sensibili.

Lo stesso problema di « package » si pone anche per i trasponditori del SECOR; tuttavia non essendo legati a problemi meccanici, essi sono molto flessibili nella forma e adattabili a qualsiasi esigenza di bordo, ed inoltre debbono emettere piccole potenze, anche la disponibilità di energia può essere limitata.

I sistemi COTAR non presentano invece nessuna difficoltà perché essi sfruttano qualsiasi emissione da bordo, e, nel caso che non vi sia a bordo una emittente, un trasmettitore CW, miniaturizzato alle dimensioni di un sigaro avana, è sufficiente perché il cotar determini la posizione del bersaglio.

Questa semplicità di funzionamento trova riscontro nella semplicità operativa dei sistemi interferometrici rispetto ai radar.

Vogliamo per un momento seguire lo svolgimento delle operazioni durante un lancio di missile aria-aria contro un velivolo bersaglio radioguidato?

Le due Stazioni MATTS ricevono il segnale da bordo del velivolo bersaglio, ne rilevano i coseni direttori che, forniti in forma digitale ad un calcolatore, consentono automaticamente e senza particolari elaborazioni il rilevamento della traiettoria. Non appena il velivolo intercettore ed il missile sono in vista ottica, dalle stazioni vengono rilevati i loro coseni direttori, forniti dalla stessa calcolatrice, i quali permettono il tracciamento delle traiettorie.

Dal momento del lancio fino alla fine dell'operazione la calcolatrice fornisce oltre le traiettorie anche la «miss-distance» e la «escape-distance».

Tutto è automatico, non richiede intervento umano, basta solo che vi siano i segnali da rilevare.

Se la stessa operazione deve essere svolta con i radar, supponendo di fare la doppia copertura, abbiamo bisogno di un radar di ricerca, 6 coppie di puntatori ottici, 6 radar tracking con i relativi operatori, 3 calcolatrici per la trasformazione dei rilevamenti angolari dei 3 mobili in funzione trigonometriche, 3 digitalizzatori di dati e finalmente il calcolatore di traiettoria.

Ogni commento è superfluo.

Vorrei però sottolineare un dettaglio.

Le formule per la determinazione delle coordinate del punto partendo dai rilevamenti, comportano, in qualsiasi forma, l'uso di funzioni trigonometriche seno e coseno.

I sistemi interferometrici ci danno, per il loro principio di funzionamento i valori di queste funzioni e si può procedere nei calcoli senza bisogno di ulteriori manipolazioni.

I dati angolari dei radar escono, per loro natura, sotto forma di angoli e per la trasformazione in funzioni circolari dobbiamo fare uso di resolver da cui non possiamo aspettarci né una estrema accuratezza né un'alta discriminazione dei valori di uscita, oppure sono necessari calcolatori digitali con memorie rilevanti per ricordare tutti i valori dei seni e coseni per piccole variazioni di angoli.

È inutile parlare di costi perché il confronto appena fatto sulla mole di strumentazione necessaria, nei due casi, parla da se.

Non credo quindi azzardato asserire che l'era dei radar-pulse come strumentazione principe sui Poligoni, va lasciando il posto alla nuova tecnica che si va affermando.

Fonti altamente qualificate dell'Esercito, della Marina e dell'Aviazione Americana confermano questa osservazione quando, in documenti Ufficiali, dichiarano che i sistemi interferometrici producono dati più accurati dei pulse-radar, quantunque alcuni pulse-radar di precisione forniscano dati di accuratezza comparabile con i sistemi ottici.

E che l'avvenire della tecnica del tracking interferometrico sia luminoso, lo si può osservare dal fatto che i responsabili della strumentazione dei Poligoni Americani hanno deciso di non stanziare più fondi per gli studi dei pulse-radar, ma di sostenere notevolmente i sistemi a comparazione di fase un po' erroneamente detti interferometrici.
