

SCALE DI TEMPO COORDINATO ED INTEGRATO E PRECISIONE NELLA CONSERVAZIONE DEL TEMPO

Nota di E. PROVERBIO e F. CHLISTOVSKY (*)
(Stazione Astronomica Internazionale di Latitudine - Corleforte)
(Osservatorio Astronomico di Brera - Milano)

SUMMARY. — Two scales of physical coordinated time UTC_{Mi} and integrated time UTC_{INT} established at the Brera Observatory of Milan are studied.

Both scales are based on the fundamental frequency oscillator P_1 . The first is compared with the coordinated average \overline{UTC} scale time by means of conventional time signals, the second, constructed by means of comparisons of local master clock frequency with the frequency of 16 KHz emitted by the station *GBR*, is synchronized making this scale to coincide with the UTC_{Mi} scale at the epoch January 1, 1965, 0^h T.U.

The deviations between the two scales, analysed by statistical methods, can be interpreted as short and long period variations caused by radiowave ionospheric propagation, and as irregularities depending by comparison methods.

Considering predominant the effect of the \overline{UTC} scale, mainly because of conventional time signal propagation irregularities, the statistical parameters which characterize the two scales are given.

RIASSUNTO. — Si studiano le due scale di tempo fisico coordinato UTC_{Mi} e integrato UTC_{INT} costituite all'Osservatorio Astronomico di Brera.

Ambedue le scale sono basate sulla frequenza dell'oscillatore fondamentale P_1 . La prima è confrontata con la scala di tempo coordinato medio \overline{UTC} per mezzo di segnali orari convenzionali, la seconda, determinata mediante confronti della frequenza campione locale con la frequenza campione di 16 KHz emessa dalla stazione *GBR*, è sincronizzata facendo coincidere detta scala con la scala UTC_{Mi} all'epoca gennaio 1, 1965, 0^h T.U.

Le deviazioni tra le due scale, studiate con procedimenti statistici, si possono interpretare come variazioni a corto e lungo termine dovute alla propagazione ionosferica delle radioonde e ad irregolarità dipendenti dai metodi di confronto. Ritenendo come effetto preponderante quello della scala \overline{UTC} , causato principalmente dalle irregolarità di propagazione dei segnali orari convenzionali, si danno i parametri statistici caratteristici delle due scale.

1. - INTRODUZIONE

1.1 I recenti progressi nella tecnologia delle ricerche spaziali e l'impiego sempre più generale ed accurato delle scale di tempo al livello della ricerca astro-

(*) Ricevuta il 16 Settembre 1969.

nomica e fisica hanno imposto un più rigoroso controllo della stabilità delle scale di tempo coordinato ed atomico locale e della sincronizzazione fra le varie stazioni e servizi orari (BARNES and ANDREWS 1965; ANDREWS 1965).

Generalmente il controllo delle scale di tempo è basato su sistemi di confronto di un certo numero di campioni di frequenza e di tempo. L'introduzione della tecnica del confronto a distanza di frequenze campioni per mezzo di trasmissioni *VLF* e *LF* ha permesso di comprendere nel sistema di controllo frequenze campione generate da oscillatori a quarzo od atomici situati a grande distanza. Allo stesso modo la sincronizzazione delle scale di tempo può essere realizzata per mezzo di segnali di tempo convenzionali. Tuttavia la precisione ottenibile con quest'ultimo sistema nella sincronizzazione del tempo sembra in generale inferiore di quella realizzabile mediante la costituzione di una scala di tempo integrato, basata cioè su un procedimento di integrazione degli scarti di frequenza fra il campione locale e quello di confronto. Naturalmente questo metodo richiede che almeno una volta venga determinato con adeguata precisione lo zero della scala di tempo locale integrata rispetto ad una seconda scala di tempo (coordinato od atomico) (PROVERBIO et CHLISTOVSKY 1969).

Considerando il notevole interesse di disporre di una scala di tempo sufficientemente omogenea ed uniforme, nella presente ricerca vengono esposti i risultati dei confronti e delle riduzioni che hanno portato alla costituzione ed alla discussione di due scale di tempo coordinato ed integrato.

2. - COSTITUZIONE DELLE SCALE DI TEMPO COORDINATO ED INTEGRATO

2.1 La scala di tempo coordinato dell'Osservatorio di Milano UTC_{Mi} è stata basata fino alla fine del 1968, sulla frequenza dell'oscillatore fondamentale $P1$, le cui prestazioni sono state ampiamente studiate in precedenti ricerche (PROVERBIO et CHLISTOVSKY 1968b). Tale scala di tempo è stata giornalmente confrontata con altre scale di tempo e con la scala di tempo coordinato medio \overline{UTC} per mezzo di segnali orari convenzionali. La scala \overline{UTC} viene determinata, per il periodo 1965-1966, dalla media aritmetica degli istanti di ricezione delle stazioni *FTA 91*, *FTK 77*, *WWV*, *HBN*, *OMA*, *MSF*, *OLB 5*, *IBF*, mentre nel periodo 1967-1968 le stazioni *WWV* ed *HBN* sono state sostituite da *DIZ* ed *HBG*.

La sincronizzazione fra le varie scale di tempo è resa possibile riducendo i valori dei confronti di tempo all'emissione, utilizzando le correzioni dei ritardi di propagazione dei segnali orari. I valori dei ritardi di propagazione utilizzati, calcolati con un procedimento di compensazione interna (PROVERBIO et CHLISTOVSKY 1968a), costituiscono un sistema sufficientemente omogeneo dal punto di vista della precisione nella costituzione della scala di tempo coordinato medio \overline{UTC} .

I valori giornalieri dei confronti ($UTC_{Mi} - \overline{UTC}$) per il periodo 1965-1968 ridotti all'emissione sono rappresentati in diagramma nella Fig. 1

A causa delle frequenti correzioni e variazioni delle scale di tempo coordinato associate alle varie emissioni, le differenze $UTC_{Mi}-\overline{UTC}$ presentano delle discontinuità che introducono sensibili incertezze nella sincronizzazione del tempo. Per eliminare tali discontinuità è stata costituita per il periodo 1965-1968 una seconda scala di tempo coordinato medio uniforme, ottenuta dalla scala \overline{UTC} correggendo quest'ultima dagli errori dovuti alle discontinuità riscontrate. In tal modo è stato possibile disporre di valori dei confronti $(UTC_{Mi}-\overline{UTC})_{un}$ affetti da sole variazioni continue e discontinue di natura accidentale. Tali variazioni sono pure rappresentate nella Fig. 1

Le quantità $(UTC_{Mi}-\overline{UTC})_{un}$ si possono quindi considerare affette da variazioni regolari in funzione del tempo, dipendenti dalle variazioni della frequenza ν_o dell'oscillatore locale e dell'oscillatore medio campione di confronto $\bar{\nu}$, esprimibili per mezzo della funzione $f(\nu_o, \bar{\nu}, t)$, e da variazioni pure esse regolari dipendenti invece da variazioni apparenti, causate da fenomeni di propagazione. Queste ultime irregolarità possono essere espresse dalla funzione $\varphi(\bar{d}, \bar{\nu}, t)$, nella quale \bar{d} rappresenta la distanza media del campione di confronto.

Oltre a queste variazioni è necessario tenere conto di altre variazioni a più breve termine di tipo accidentale che chiamiamo $\Psi(t)$, causate dalle approssimazioni usate nei procedimenti di misura e di calcolo. Tenendo conto di tutte queste irregolarità è lecito esprimere le quantità $(UTC_{Mi}-\overline{UTC})_{un}$ per mezzo dell'espressione:

$$(1) \quad (UTC_{Mi} - \overline{UTC})_{un} = f(\nu_o, \bar{\nu}, t) + \varphi(\bar{d}, \bar{\nu}, t) + \psi(t).$$

Nei diagrammi di Fig. 1 le variazioni di maggiore ampiezza sono attribuibili al primo termine di quest'ultima espressione ed in particolare alle variazioni ed alle correzioni della frequenza ν_o in funzione del tempo e quindi della scala UTC_{Mi} . Tuttavia è di grande interesse conoscere ed analizzare l'influenza che i rimanenti due termini esercitano sulla stabilità della scala di tempo \overline{UTC} .

2.2 Un tentativo di pervenire a risultati attendibili in merito alla conoscenza delle quantità $\varphi(\bar{d}, \bar{\nu}, t)$ è stato effettuato, costituendo per lo stesso periodo una scala di tempo integrato $(UTC)_{INT}$, basata su confronti della frequenza campione ν_o con la frequenza $\nu = 16$ kHz della emissione campione della stazione GBR, la cui stabilità in fase è garantita entro ± 10 μ s rispetto alla frequenza convenzionale del campione di frequenza al cesio del N.P.L. (dal 1967 rispetto alla frequenza del campione al cesio del R.G.O.).

Chiamando t la scala di tempo associata alla frequenza ν e t_o quella associata alla frequenza del campione locale ν_o si ha,

$$t = N/\nu , \\ t_o = N/\nu_o .$$

dove N è il numero di oscillazioni compiute da ν nel periodo t (o da ν_o nel pe-

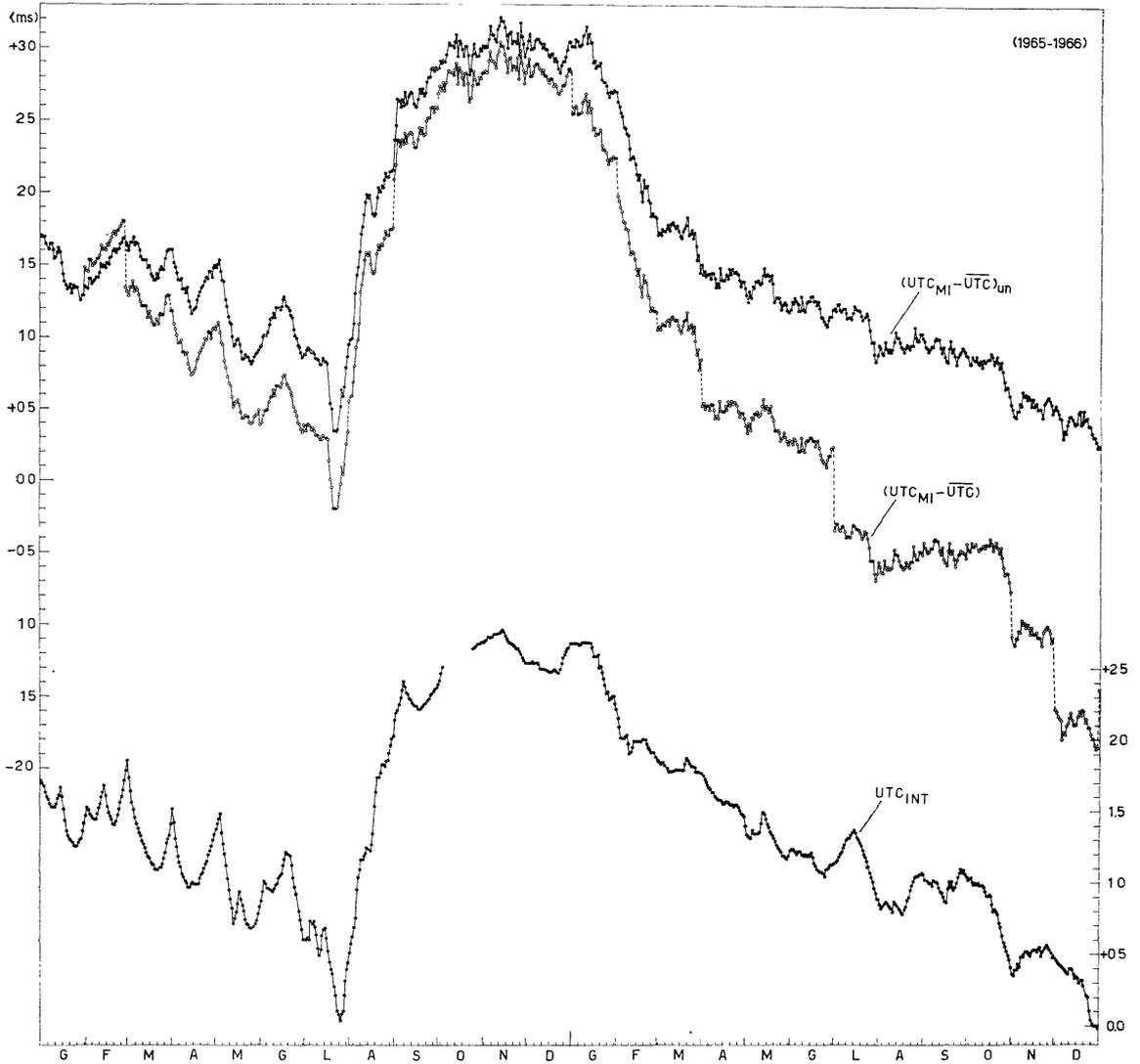


Fig. 1a - Andamento delle scale di tempo UTC_{INT} e UTC_{Mi} rispetto alle scale di tempo coordinato \overline{UTC} ed \overline{UTC}_{un} per il periodo 1965-1966.

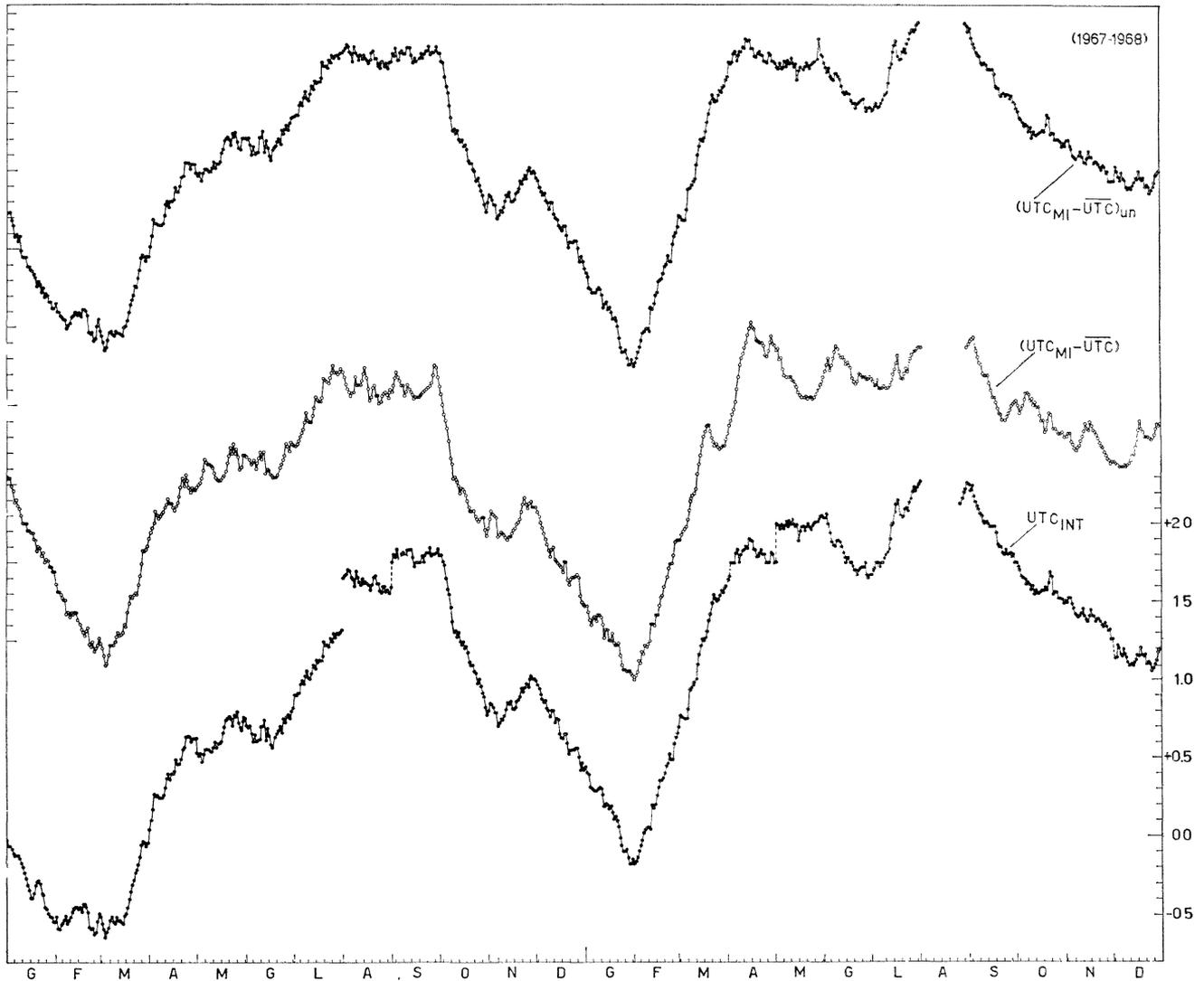


Fig. 1b - Andamento delle scale di tempo UTC_{INT} e UTC_{Mi} rispetto alle scale di tempo coordinato \overline{UTC} ed \overline{UTC}_{un} per il periodo 1967-1968.

riodo t_0). Differenziando ed eliminando la quantità dN dalle precedenti si perviene poi facilmente all'espressione

$$t = \int_0^{t_0} \frac{\nu}{\nu_0} dt_0,$$

da cui, essendo generalmente le frequenze ν e ν_0 molto prossime fra di loro, ponendo $\nu_0 = \nu + \Delta\nu$, si ottiene a meno di termini generalmente trascurabili,

$$t - t_0 = - \int_0^{t_0} \frac{\Delta\nu}{\nu} dt_0.$$

Il valore delle quantità al secondo membro è stato calcolato giorno per giorno ($t_0 = 24^h$), e sommando i valori degli incrementi giornalieri è stata realizzata la scala di tempo $UTC_{INT} = \Sigma (t-t_0)_m$ per il periodo 1965-1968.

La sincronizzazione di questa scala di tempo si è ottenuta poi facendo coincidere la stessa scala con la scala UTC_{Mi} per l'epoca gennaio 1, 1965, 0^h di T.U. Le deviazioni della scala UTC_{INT} rispetto alla scala di tempo GA ($GA2$ dall'ottobre 1968) del R.G.O., che a meno di quantità dell'ordine $\pm 10 \mu s$ può essere confusa con la scala di tempo integrato costituita sulla base della frequenza della stazione GBR all'emissione, sono rappresentate nella Fig. 1.

Così come le quantità $(UTC_{Mi} - \overline{UTC})_{um}$ anche i valori UTC_{INT} presentano variazioni dipendenti dalle frequenze ν_0 e ν alla emissione in funzione del tempo, e delle variazioni della frequenza ν per effetto di fenomeni di propagazione. Si possono quindi esprimere le quantità UTC_{INT} stesse per mezzo della relazione, analoga alla (1),

$$(2) \quad UTC_{INT} = f_1(\nu_0, \nu, t) + \varphi_1(d, \nu, t) + \psi_1(t).$$

Ritenendo, con sufficiente rigore, la stabilità delle frequenze $\bar{\nu}$ e ν all'emissione, di ordine superiore alle rimanenti variazioni, otteniamo, sottraendo la (2) dalla (1)

$$(3) \quad \Delta UTC_{un} = \varphi(\bar{d}, \bar{\nu}, t) - \varphi_1(d, \nu, t) + \psi(t) - \psi_1(t).$$

Le quantità ΔUTC_{un} , assieme alle corrispondenti quantità ΔUTC ottenute considerando la scala di tempo \overline{UTC} non uniforme, sono rappresentate nella Fig. 2,

3. - ANALISI DELLE VARIAZIONI DELLA SCALA DEL TEMPO

3.1 L'analisi statistica dei valori calcolati con la relazione (3) presenta notevole interesse dal punto di vista dall'interpretazione di queste stesse variazioni. Queste ultime possono essere infatti interpretate come variazioni a corto e lungo termine dovute alla propagazione ionosferica delle radio onde e ad irregolarità dipendenti

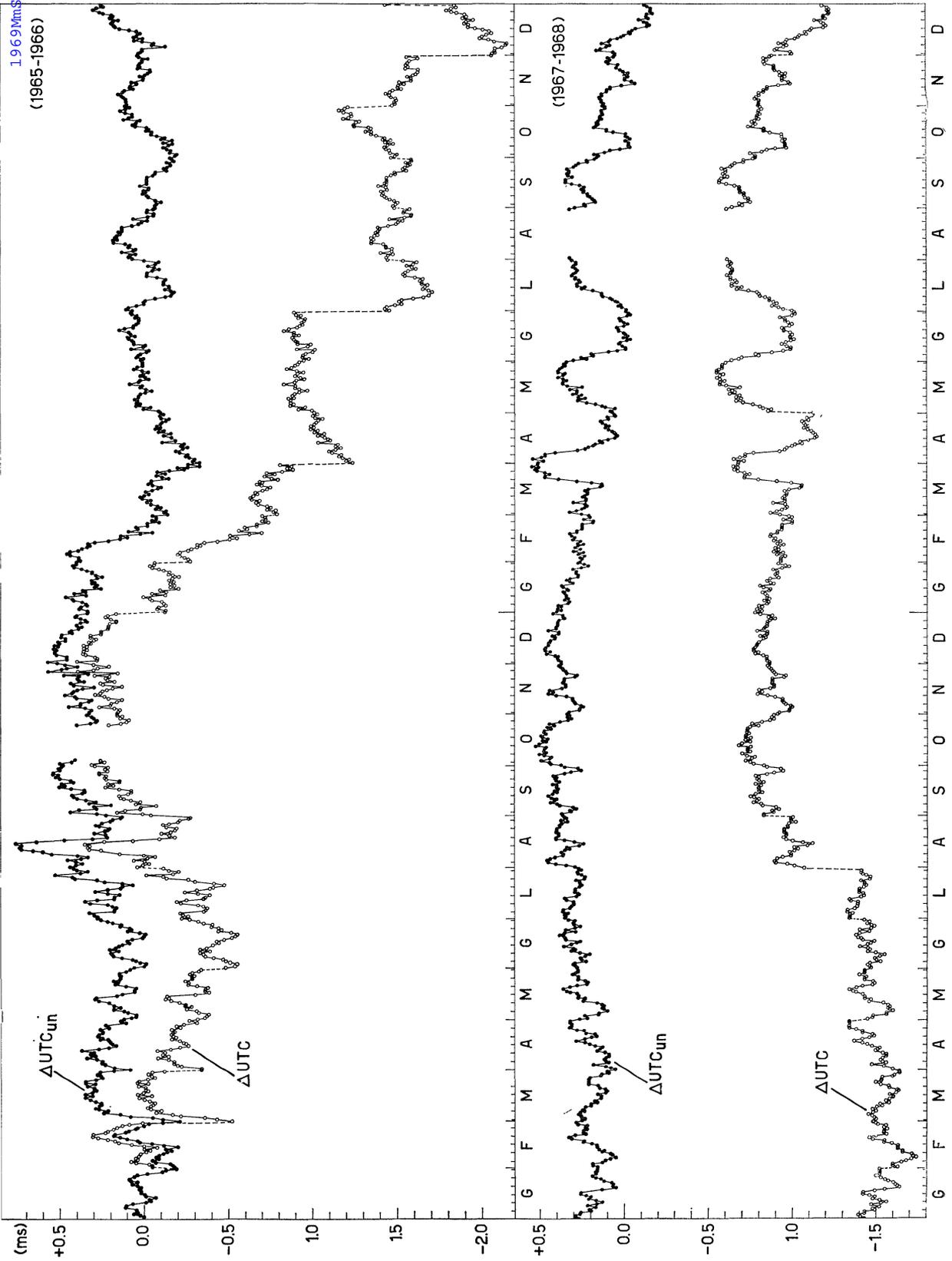


Fig. 2 - Andamento delle variazioni ΔUTC_{un} e ΔUTC delle scale di tempo, dipendenti dalla propagazione delle radioonde e dai metodi di comparazione.

dai metodi di confronto. Se è lecito ammettere che l'effetto preponderante di queste variazioni deve essere attribuito, alla ricezione, alla scala \overline{UTC} , i dati statistici rilevati possono essere in gran parte attribuiti all'effetto che le irregolarità di propagazione dei segnali orari convenzionali presentano sulla stabilità dei confronti delle scale di tempo e della sincronizzazione delle stesse scale.

TABELLA I

n	$\overline{\sigma}_n$	σ_n	σ_n^*
(giorni)	($\pm 0^s,0001$)	μs	($0^s,0001$)
5	2,92	130	0,155
10	2,76	87	0,76
30	2,64	48	0,98
100	2,62	26	1,45
500	2,26	10	2,25
1500	2,62	7	2,62

Se si prescinde dalle variazioni periodiche (diurne e stagionali) contenute nei termini φ e φ_1 , le quantità ΔUTC_{un} sono suscettibili di essere rappresentate da una successione di valori a carattere irregolare. Tali irregolarità sono l'effetto di fenomeni aleatori a corto e lungo termine, per cui anche i parametri statistici che solitamente vengono presi in considerazione per valutare quantitativamente l'effetto di questi stessi fenomeni, come ad esempio la varianza, non possono essere interpretati se non in funzione della durata dei periodi presi in esame.

Le quantità ΔUTC_{un} possono inizialmente essere interpretate come scarti di natura puramente accidentale. In tal caso è possibile calcolare le deviazioni standard (varianza) di queste stesse quantità su periodi di tempo n (espressi in giorni) di diversa durata, compresi fra 5 a 1500 giorni. I valori medi $\overline{\sigma}_n$ delle varianze calcolate, relative a tutto l'intervallo 1965-1968, sono dati nella Tabella I e nel diagramma di Fig. 3.

A titolo di esemplificazione nelle Fig. 4 e 5 sono invece rappresentati i singoli valori (punti vuoti) delle quantità $\overline{\sigma}_n$, per $n = 5, 10, 30$ e 100 giorni, l'intervallo fra le prime due serie di dati ($n = 5, 10$) essendo stato limitato, in figura, all'anno 1965.

Il significato dei valori della varianza $\overline{\sigma}_n$ è in tal caso condizionato dall'esistenza di oscillazioni molto ampie e di periodo lungo, come appare chiaramente dal diagramma di δ_{100} in Fig. 5; in altre parole i valori della varianza su periodi corti (inferiore ad un anno) contengono *integralmente* l'effetto delle irregolarità a periodo maggiore, e possono essere quindi considerate come il limite superiore caratteristico

del parametro σ . Sotto questa ipotesi è naturale che l'errore standard σ_n della scala di tempo \overline{UTC} diminuisca proporzionalmente al tempo secondo la relazione,

$$\sigma_n = \frac{\overline{\sigma}_n}{\sqrt{n}} .$$

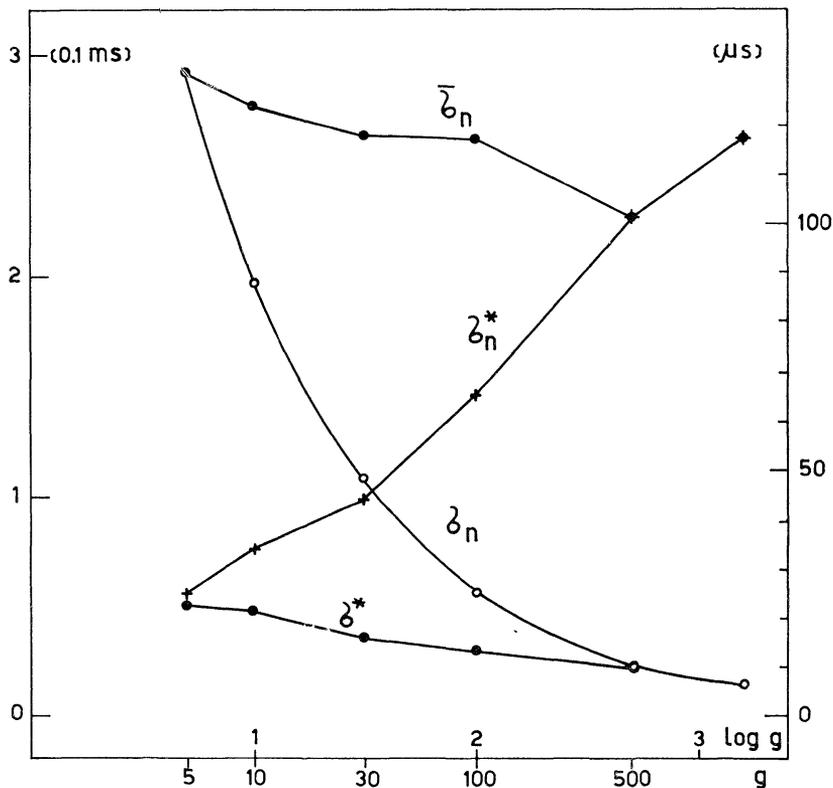


Fig. 3 - Valori delle deviazioni standard (varianza) calcolate ed osservate delle quantità ΔUTC_m in funzione dell'intervallo g espresso in giorni.

I valori di σ_n , rappresentati nella Fig. 3, e dati nella Tabella I, mostrano che il valore massimo dell'imprecisione, attribuibile, come si è detto, in gran parte alla scala UTC , e cioè alla tecnica di sincronizzazione legata ai metodi di confronto convenzionali, si riduce sul periodo di un anno a circa $\pm 12 \mu s$.

L'effetto globale dei valori:

$$(4) \quad \overline{\sigma_n^2} = \frac{\overline{\sigma_n^2}}{n_0} \quad (n_0 \geq 5)$$

è caratterizzato anche dalla dispersione di questi stessi valori in funzione del tempo. Nella Tabella II sono dati i valori estremi della serie $\overline{\sigma}_n$, per n variabile, calcolati in funzione del tempo (si vedano anche le Fig. 4 e 5).

Il decremento dei valori estremi all'aumentare di n costituisce infatti dal punto di vista della teoria degli errori una ulteriore riprova della validità della (4).

TABELLA II

n	$\Delta\sigma$
(giorni)	($\pm 0^{\circ}.0001$)
5	$0.2 \div 7.3$
10	$0.3 \div 6.7$
30	$0.5 \div 4.8$
100	$0.9 \div 4.3$

La valutazione dei valori della deviazione standard, relativi alle variazioni proprie di ogni singolo periodo ed in particolare dei periodi brevi, all'incirca compresi fra 1 giorno ed un anno, può invece essere effettuata prescindendo dalle componenti a termine maggiore, che si manifestano rispetto alle prime con carattere di sistematicità.

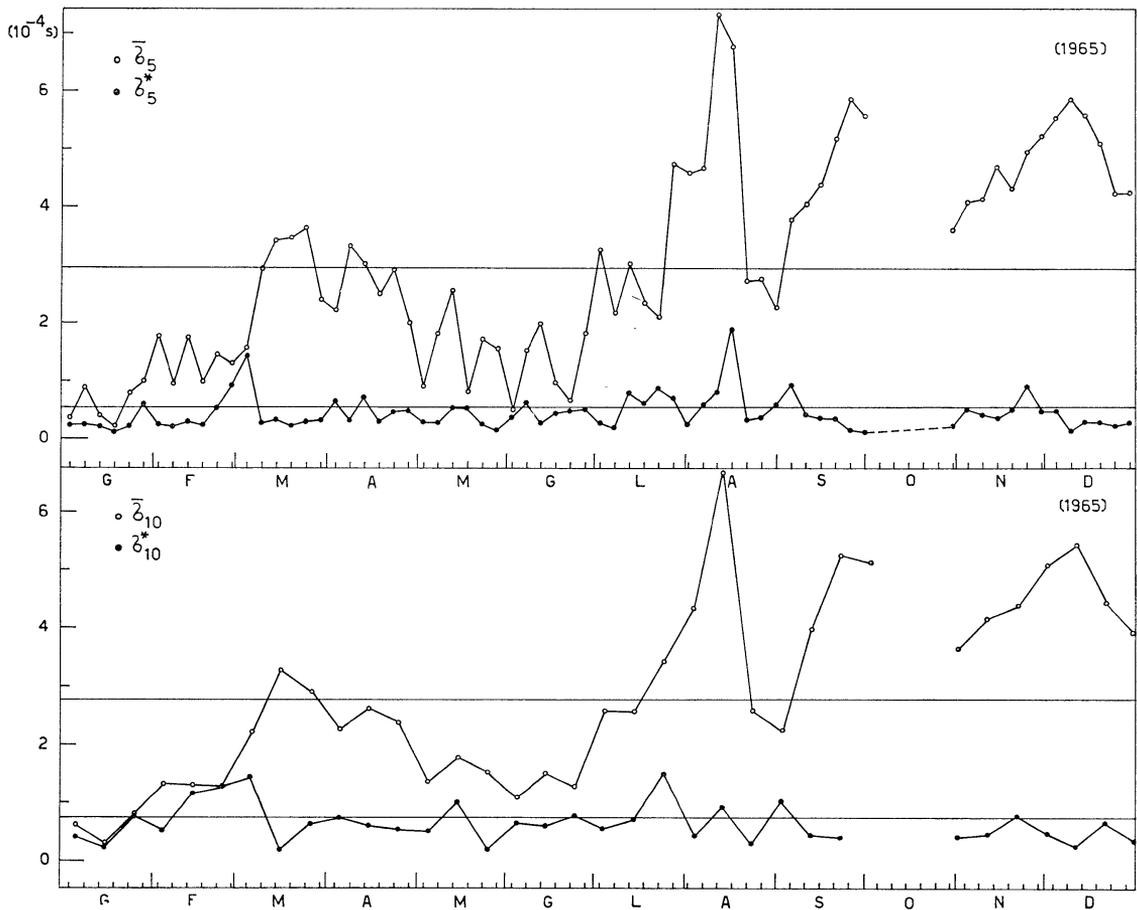


Fig. 4 - Variazione delle deviazioni standard σ e σ^* calcolate su intervalli di 5 e 10 giorni in funzione del tempo, per l'anno 1965.

Sottraendo dalle quantità ΔUTC_{un} i valori medi calcolati per i diversi periodi qui considerati (5, 10, 30, 100, 500 e 1500 giorni) e considerando le differenze come scarti accidentali caratteristici dei vari periodi si sono valutate le varianze σ_n^* in funzione del tempo e del periodo n . Nella Fig. 4 sono rappresentati (con

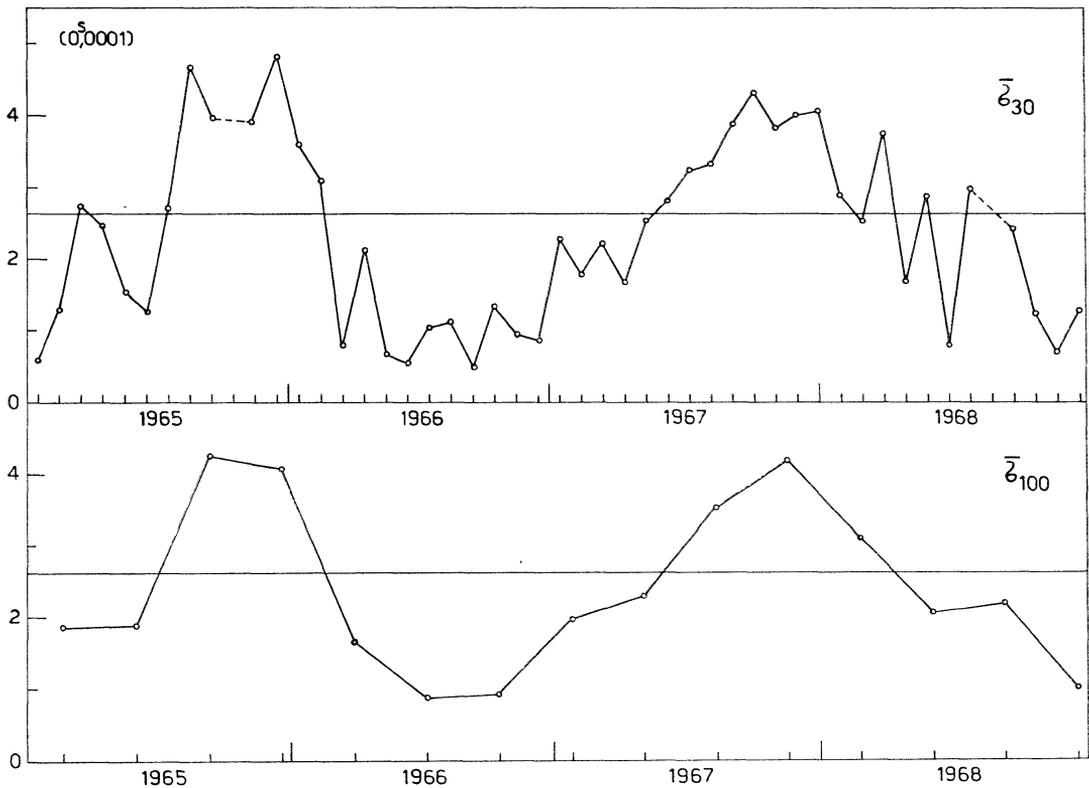


Fig. 5 - Variazione delle deviazioni standard σ e σ^* calcolate su intervalli di 30 e 100 giorni in funzione del tempo, per il periodo 1965-1968.

punti pieni) i valori singoli di σ_n^* per $n = 5$ ed $n = 10$ e per l'anno 1965. I valori medi delle quantità σ_n^* sono invece riportati nella Tabella I e nel diagramma di Fig. 3.

Ovviamente, in questo caso, le quantità σ_n^* rappresentano i singoli termini della (4) ad assumere, per n sufficientemente grande il valore di $\bar{\sigma}_n$.

Accettando l'ipotesi che le variazioni che concorrono nella determinazione delle variazioni σ_n^* , perlomeno per n sufficientemente piccolo, sono la somma di eventi o di variazioni diurne indipendenti, è lecito scrivere:

$$\sigma_n^{2*} = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2$$

ove σ_n è la varianza corrispondente alle variazioni accidentali diurne.

Supponendo poi mediante, $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma^*$, si ottiene subito

$$\sigma^* = \frac{\sigma_n^*}{\sqrt{n}}.$$

I valori di σ^* sono rappresentati nella Fig. 3. La relativa costanza di questi valori sembra confermare l'ipotesi fatta sull'origine degli stessi. La loro media risulta:

$$\sigma^* = \pm 17 \mu s;$$

e questo valore può essere considerato come variazione standard media *diurna* della quantità ΔUTC_{un} , in gran parte attribuibile, per quanto detto in precedenza, alle variazioni della scala \overline{UTC} .

Per quanto detto all'inizio del cap. 3.1, quest'ultimo valore rappresenta anche con buona approssimazione l'ordine di grandezza della precisione ottenibile nei confronti delle scale di tempo UTC_{un} e \overline{UTC} e nella sincronizzazione delle stesse.

BIBLIOGRAFIA

- BARNES, I. A., ANDREWS, D. H. 1965, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, **4**, 228.
 ANDREWS, D. H. 1965, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, **4**, 233.
 PROVERBIO, E., CHLISTOVSKY, E. 1968a, *Proc. Coll. on the problems of Time determ. Keep, and Synchr.* Milano, p. 133.
 PROVERBIO, E., CHLISTOVSKY, E. 1968b, *Proc. Coll. on the problems of Time determ. Keep, and Synchr.* Milano, p. 301.
 PROVERBIO, E., CHLISTOVSKY, F. 1969, *Actès Congrès Inter. Chron., Paris*, A24-1.