

INSEGUIMENTO OTTICO DEI SATELLITI ARTIFICIALI: PREVISIONE E RIDUZIONE DEI DATI DI OSSERVAZIONE

Nota di ALESSANDRO MANARA (*)
(*Osservatorio Astronomico di Brera - Milano*)

SUMMARY. — The whole proceeding for the optical tracking of artificial satellites at the Brera Observatory is treated. General previsions of the passages in the sky of Milan are followed by the exact previsions given by the computer IBM 1620. Then an estimation of observation precisions follows.

The last topic is a short description of the utilisation of observed positions.

RIASSUNTO. — Viene trattato il procedimento completo in uso all'Osservatorio astronomico di Brera per l'inseguimento ottico dei satelliti artificiali. Si inizia con le previsioni generali dei passaggi su Milano, indi si passa alle previsioni esatte mediante calcolatore IBM 1620.

Fa seguito una valutazione delle precisioni delle osservazioni. Infine si ha una breve esposizione del modo in cui vengono utilizzate le posizioni osservate.

1. - PREMESSA

In una precedente nota (MANARA 1966 a) sulla strumentazione dell'Osservatorio di Brera per l'inseguimento dei satelliti artificiali, sono state descritte anche le riduzioni delle relative osservazioni. In questa nota si espone un metodo per la previsione dei passaggi e per la riduzione delle osservazioni dei satelliti artificiali, la cui applicabilità presenta dei vantaggi pratici rispetto a quello precedente.

2. - RICERCA DEI SATELLITI DA OSSERVARE

Per svolgere determinate ricerche di astrodinamica programmate presso l'Osservatorio di Brera, è stato selezionato un certo numero di satelliti artificiali di magnitudine stellare compresa tra 0 e +7.

(*) Ricevuta il 22 Marzo 1968.

Come noto, la magnitudine dei satelliti artificiali, di forma non sferica, viene dedotta dal confronto con stelle di magnitudine nota; per quei veicoli spaziali che hanno, invece, forma sferica, si calcola l'illuminamento solare (E) del satellite e da questo si passa alla determinazione della sua magnitudine (m).

Infatti dalla relazione di WHIPPLE (1958) si ha

$$E = 1.154 \times 10^4 \frac{a b^2}{r^2} E_0 \text{ (lux)}$$

dove:

r , distanza satellite-osservatore (in metri);

a , coefficiente di riflettività;

b , raggio del satellite (in metri);

$E_0 = 1.2 \times 10^5$ (in lux), illuminamento, proveniente dal Sole, incidente sul satellite.

La relazione che lega la magnitudine e l'illuminamento è:

$$m = -14.13 - 2.50 \lg E$$

Stabiliti, così, i satelliti artificiali da osservare si costruisce il relativo diagramma di previsione e di identificazione giornaliera, del quale un esempio è riportato in Fig. 1. In esso, infatti, sono tracciate le previsioni, per l'orizzonte di Milano, dell'Echo I, Echo II, Pageos I per l'anno 1968. Le previsioni sono state calcolate con il solito metodo (MAMMANO 1961). Ogni retta di individuazione è stata tracciata unendo almeno tre dei punti rappresentanti i passaggi zenitali di un dato giorno distanziati tra essi di circa 15 giorni. Vengono rappresentate le linee sia in NS che in SN .

Ogni retta è il luogo dei punti di passaggi zenitali per ciascun satellite per un determinato giorno. Tali rette sono però da considerarsi a solo carattere orientativo. Nel caso di satelliti passanti più volte la stessa sera sull'orizzonte dell'osservatore, nel diagramma viene rappresentato approssimativamente soltanto il passaggio centrale. Le linee curve rappresentano il sorgere e il tramonto del Sole, quelle tratteggiate il crepuscolo. Il tempo è espresso in T.M.E.C.; tali previsioni sono state calcolate sulla base dei normali bollettini del « Goddard Space Flight Center » e sulle osservazioni effettuate lo scorso anno. È opportuno far notare che per l'osservazione del satellite è necessario che esso si trovi, oltre che nelle condizioni favorevoli del diagramma, in posizione tale da essere illuminato dal Sole. Questo è esplicitamente segnalato nei bollettini di previsione.

3. - CALCOLI PRECISI DI OSSERVAZIONE.

Conosciuti in tal modo i satelliti che passano sull'orizzonte nelle ore favorevoli all'osservazione si passa al calcolo preciso degli istanti e delle posizioni. A tal uopo su apposite tabelle (Tabella I), vengono riportati i dati forniti dal « Goddard Space

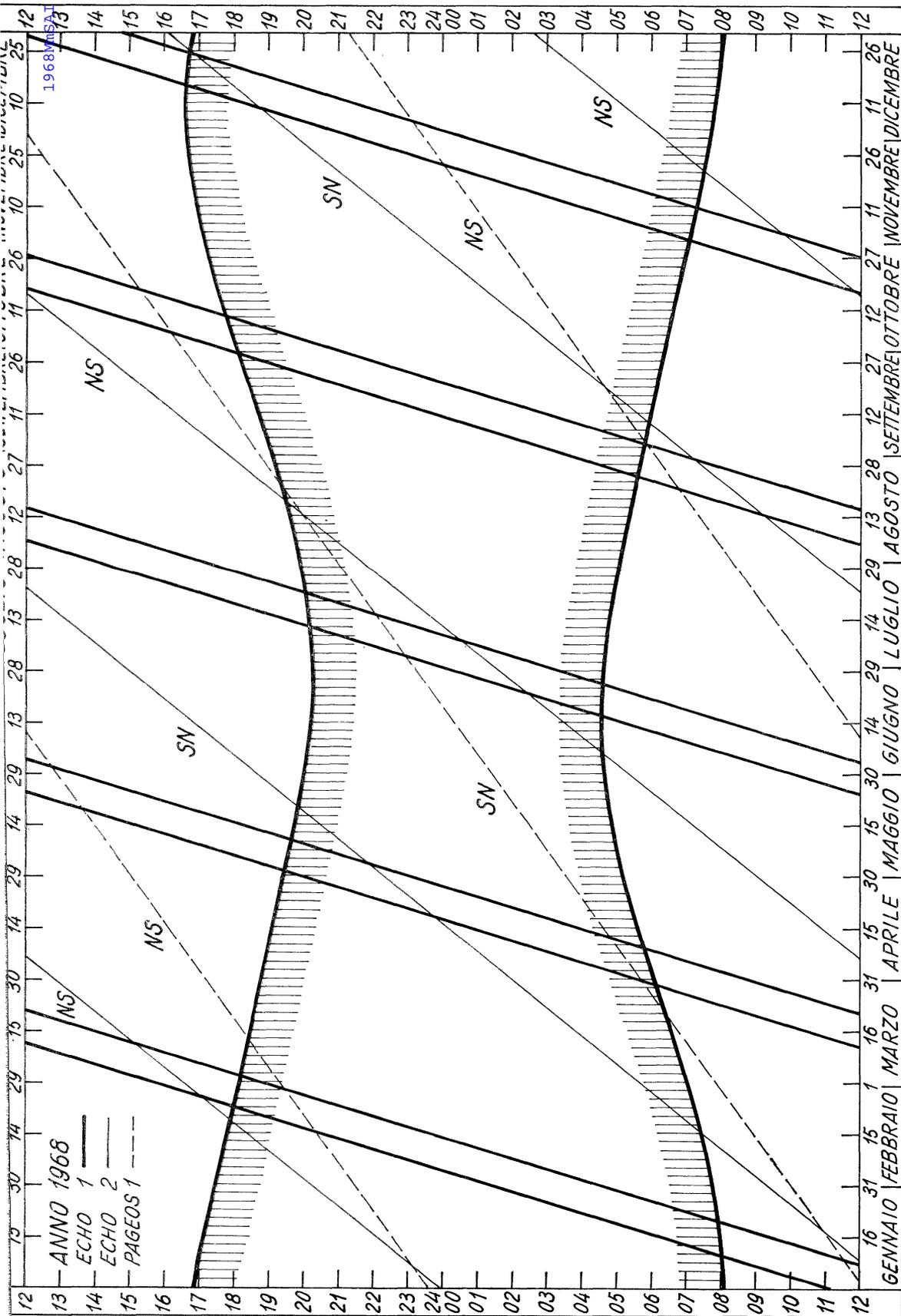


Fig. 1 - Previsioni generali, per il 1968, dei passaggi nel cielo di Milano dei satelliti ECHO 1, ECHO 2, e PAGEOS 1. È facile che tali previsioni non corrispondano ai passaggi reali per l'attività solare di quest'anno che procura una forte perturbazione. Per l'ECHO 1, la cui caduta è prevista entro il 1968, le linee rappresentano alternativamente le traiettorie SN e NS.

TABELLA I

Previsione Passaggio Satelliti

MILANO - BRERA

ANNO: 1967

MESE: Marzo

 $\phi_0 = 45. 27. 59.11$; $\lambda_0 = 9. 11. 27.5$; $\delta_0 = 6367.3$; $q_0 = .15$; $q_h = 100.$; $Z_0 = -6.818244$

Dati Tabulari

Satellite: ECHO 2		LAT. N. δ	MIN. PLUS. C ₁	LONG. CORR. C _A	KILOM q _s	RAGG. TERR.	LAT. NORD.	RAGG. TERR.
Direzione: SN		30.	9.16	357.38	1141.1	6372.8	0. = 6378.2	
		45.	13.725	354.78	1109.7	6367.5	10. = 6377.5	
		50.	15.25	353.64	1099.1	6365.6	20. = 6375.7	
							25. = 6374.3	
	DATA	REV.	TIME Z	LONG. W	TEMPO SIDER.		30. = 6372.8	
1	13	15201	2315.76	344.44	==	1.1 1.2 1.3	31. = 6372.5	
2	14	15215	14.95	1.15	==	2.1 2.2 2.3	32. = 6372.2	
3	14	15228	2327.01	350.94	==	3.1 3.2 3.3	33. = 6371.8	
4						4.1 4.2 4.3	34. = 6371.5	
5						5.1 5.2 5.3	35. = 6371.1	
6						6.1 6.2 6.3	36. = 6370.9	
7						7.1 7.2 7.3	37. = 6370.4	
8						8.1 8.2 8.3	38. = 6370.1	
9						9.1 9.2 9.3	39. = 6369.7	
10						10.1 10.2 10.3	40. = 6369.3	
			0	1.	1.		41. = 6369.0	
Satellite:							42. = 6368.6	
Direzione:							43. = 6368.2	
							44. = 6367.8	
							45. = 6367.5	
							46. = 6367.1	
							47. = 6366.7	
							48. = 6366.3	
							49. = 6366.0	
	DATA	REV.	TIME Z	LONG. W	TEMPO SIDER.		50. = 6365.6	
1						1.1 1.2 1.3	51. = 6365.2	
2						2.1 2.2 2.3	52. = 6364.9	
3						3.1 3.2 3.3	53. = 6364.5	
4						4.1 4.2 4.3	54. = 6364.1	
5						5.1 5.2 5.3	55. = 6363.9	
6						6.1 6.2 6.3	56. = 6363.4	
7						7.1 7.2 7.3	57. = 6363.1	
8						8.1 8.2 8.3	58. = 6362.7	
9						9.1 9.2 9.3	59. = 6362.4	
10						10.1 10.2 10.3	60. = 6362.1	
			0	1.	1.		65. = 6360.5	
							70. = 6359.2	
							80. = 6357.9	
							90. = 6356.7	

Flight Center » e quindi passati al calcolatore 1620 IBM, che mediante apposito programma fornisce l'istante, l'azimut, la distanza zenitale strumentale del passaggio del satellite a tre latitudini arbitrarie. La colonna indicata con « tempo siderale » viene riempita solo nel caso che si vogliono ottenere le previsioni in ascensione retta e declinazione.

La Tabella II riassume i dati stampati dal calcolatore per una sola orbita del satellite Echo II il giorno 13 marzo 1967 nella direzione SN.

La prima riga è la latitudine di Milano in gradi, primi, secondi; la seconda la longitudine est nelle stesse unità; la terza riga rappresenta rispettivamente il raggio terrestre a Milano (in km), l'altezza dello strumento sul livello del mare (in km), la riduzione dell'ora al fuso (in centesimi di ora) e lo spostamento dello zero strumentale dallo zenit vero. Per comodità di calcolo e di osservazione sono state scelte nell'esempio che si riporta le latitudini di 30°, 45°, 50°; tuttavia possono essere impiegati altri valori di latitudine, ottenendo risultati altrettanto esatti. Se si vuole osservare il satellite al sorgere, basta prendere la latitudine in cui esso sorge (MANARA 1966b).

TABELLA II

45.000000	27.000000	59.110000	
9.000000	11.000000	27.500000	
6367.3000	.15000000	100.00000	- 6.8182440
.00000000			
1	1		
30.000000			
9.1600000	357.38000	1141.1000	6372.8000
- 8.9890279	16.979187		
24.920000	152.34555	69.533621	297.28462
0			
1	2		
45.000000			
13.725000	354.78000	1109.7000	6367.5000
- 11.589029	8.1951453		
29.485000	89.141632	45.885415	320.93283
0			
1	3		
50.000000			
15.250000	353.64000	1099.1000	6365.6000
- 12.729029	9.6991418		
31.010000	57.564771	51.774511	315.04373

Dopo questi dati riassuntivi, vengono stampati i veri risultati che sono quelli rappresentati nell'ultima riga dei gruppi contrassegnati con 1-1, 1-2, 1-3; ad esempio si può vedere che il satellite Echo II il giorno 13 marzo 1967 ha tagliato la latitudine di 45° alle ore 00^h29^m.485, con l'azimut (contato da nord) di 89°.141632,

la distanza zenitale di $45^{\circ}.885415$, che sullo strumento corrisponde al valore di $320^{\circ}.93283$. Nelle due righe precedenti di ogni gruppo sono rispettivamente stampati nella prima i dati forniti al calcolatore, nella seconda due valori intermedi che possono servire di controllo.

4. - PUNTAMENTO DEL GIGAS.

Con i risultati forniti dal calcolatore si può quindi predisporre il Gigas per l'azimut e per l'altezza alla quale passerà il satellite. Al tempo del passaggio si inizierà l'inseguimento automatico con l'aiuto dei due motori incorporati nello strumento. Verrà scattato il maggior numero possibile di fotografie a seconda delle condizioni di visibilità del satellite. Se la visibilità della zona che comprende la traiettoria che dovrà percorrere il veicolo spaziale presenta delle soluzioni di continuità (nubi, foschie, satellite troppo basso sull'orizzonte) si punta il Gigas in un tratto di zona più favorevole. Naturalmente al puntamento del Gigas è indispensabile far precedere tutte le operazioni preliminari: livellamento, puntamento della mira, accensione del tempo ecc. (MANARA 1966 a); inoltre bisogna registrare la pressione e la temperatura che serviranno per il calcolo della rifrazione atmosferica come vedremo più avanti.

Eseguite le fotografie e registrato il tempo si passa al loro sviluppo e alla lettura delle striscie del cronografo.

5. - RIDUZIONE DELLE OSSERVAZIONI

Per la riduzione delle osservazioni occorre tener conto, oltre ai metodi già descritti altrove (MANARA 1966 b), anche dell'eccentricità del cerchio azimutale. Tale correzione (γ) in secondi d'arco, è data dalla seguente relazione, dove L'_1 è la lettura effettiva:

$$\gamma = 9,2808 \text{ sen } (L'_1 - 54,9042)$$

Tale relazione è stata trovata usando il metodo dei minimi quadrati nella risoluzione di un sistema di quindici equazioni in tre incognite utilizzando i dati di quindici osservazioni in posizioni del cerchio azimutale quasi equidistanti tra di loro.

I risultati delle osservazioni liberati da tutti gli errori di osservazione, fotografici e dello strumento vengono quindi portati in due opportuni grafici. Nel primo vengono messi rispettivamente in ascissa il tempo ed in ordinata l'azimut di osservazione; nel secondo in ascissa il tempo ed in ordinata le distanze zenitali. Da questi due grafici è possibile stabilire, dalla posizione dei punti, le osservazioni esatte da quelle errate.

Nella Fig. 2 sono riportati in grafico in funzione del tempo le distanze zenitali per il passaggio del satellite Pageos I il giorno 5 luglio 1967 dalle ore $00^{\text{h}}57^{\text{m}}$

all'01^h25^m. In tale grafico, assai ridotto per comodità di spazio, ogni millimetro rappresenta rispettivamente 3 secondi di tempo in ascissa e 3 primi di arco in ordinata.

Da notare che una scelta delle osservazioni esatte è già stata fatta preceden-

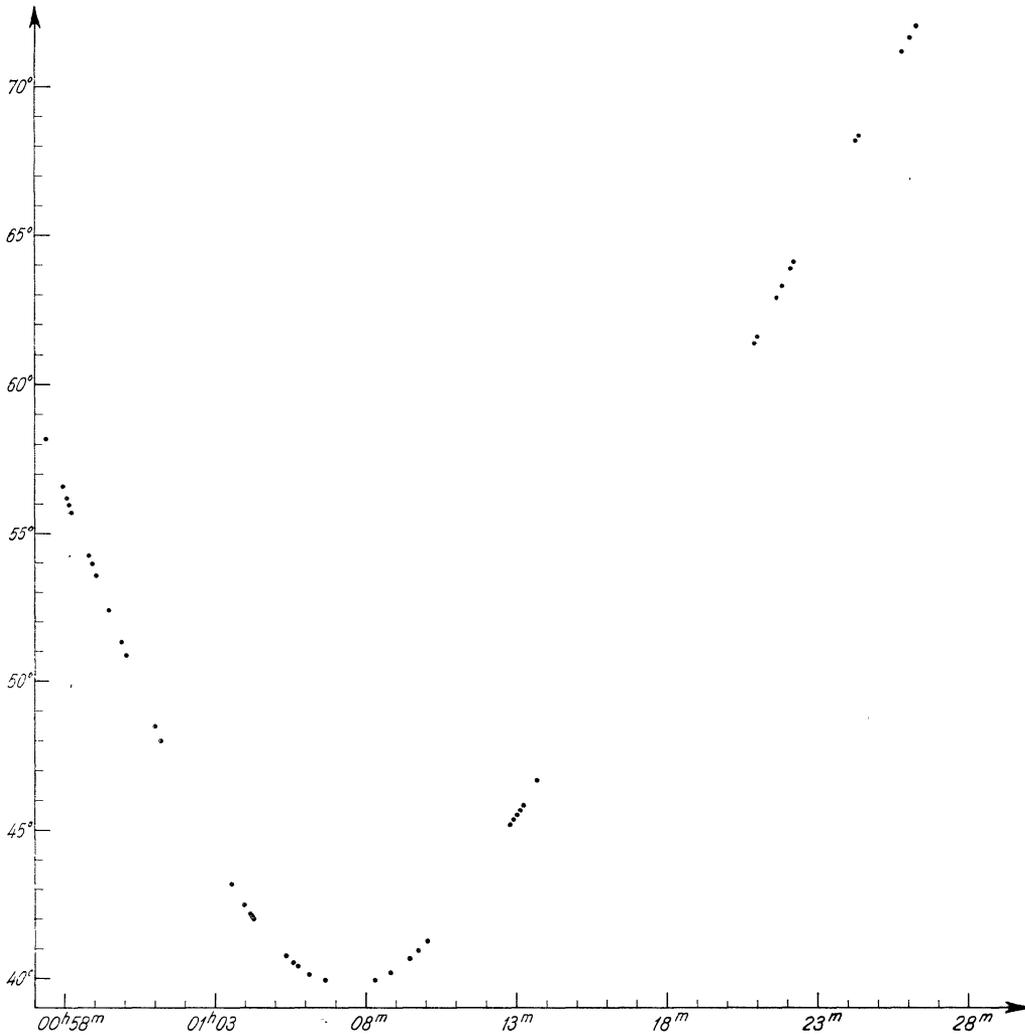


Fig. 2 - In ordinata sono portate le distanze zenitali di Pageos I (5 luglio 1967); in ascissa i corrispondenti tempi.

temente con l'aiuto di un registratore G 541, nel quale l'operatore addetto all'inseguimento del satellite trasmette di volta in volta gli eventuali spostamenti di tempo tra il passaggio del satellite e lo scatto della fotografia. Anche gli eventuali errori nella battitura del tempo sul cronografo sono comunicati istantaneamente mediante Dufono alla sede di operazione del Gigas, di modo che, in tal caso l'osservazione viene interrotta momentaneamente.

6. - PRECISIONE DELLO STRUMENTO MEDIANTE OSSERVAZIONE DI STELLE

Di tanto in tanto per verificare la precisione dello strumento vengono fotografate le posizioni di alcune stelle; dette posizioni vengono poi confrontate con quelle degli atlanti stellari opportunamente ridotte per il giorno e l'ora di osservazione. Una recente prova di tal genere ha fornito le seguenti differenze Δ tra valori osservati e valori calcolati:

TABELLA III

Osservazioni della stella Betelgeuse (α Orionis).				
T M E C			Azimut	Zenitale
00 ^h	00 ^m	02 ^s .07	- 2".56	- 0".71
00	04	46.65	+ 1 .25	- 2 .93
00	09	35.11	+ 2 .29	+ 1 .72
00	15	45.62	+ 2 .00	+ 0 .31
00	22	53.79	- 3 .71	+ 0 .61
00	29	54.60	+ 3 .73	+ 1 .43
00	32	45.91	+ 3 .44	- 1 .75
00	37	55.10	- 1 .90	- 1 .04
00	48	37.19	- 4 .02	+ 2 .47
00	53	42.02	+ 4 .48	- 0 .48
00	56	47.35	- 2 .60	- 0 .48
01	00	43.73	- 2 .30	+ 0 .01
Errore quadratico medio in azimut 3".01				
Errore quadratico medio in zenitale 1".45				

Le imprecisioni nelle osservazioni dei satelliti artificiali sono superiori per il loro rapido movimento. Infatti prendendo ad esempio un satellite abbastanza lento come l'Echo I (periodo 112 minuti) si ha una velocità angolare rispetto all'osservatore di circa $16^\circ/\text{minuto}$; quindi con brevi calcoli si deduce che tale satellite in un decimo di secondo percorre l'arco di traiettoria di un $1'.6$; dal momento che la striscia del cronografo (velocità 1 cm/sec) permette di leggere $1/100$ di secondo, si ha un'imprecisione di circa $10''$ di arco.

Per satelliti più veloci le cose si complicano notevolmente. A questo bisogna aggiungere che i satelliti nella maggior parte dei casi subiscono alcune oscillazioni che ne rendono difficile l'inseguimento ottico.

7. - USO DEI DATI OSSERVATI

Le osservazioni forniscono dunque le posizioni del satellite in azimut ed altezza. Tali valori sono solo apparenti. Tuttavia la correzione per l'aberrazione

1968MNSA...39...281M
può essere trascurata. Per la rifrazione invece bisogna tener conto anche, come detto precedentemente, della temperatura e della pressione locale oltre che, ovviamente, dell'altezza del satellite in questione. A tale uopo il prof. A. KRANJC (1967) dell'Università dell'Aquila ci ha fornito un programma di calcolo per il 7090 dell'Università di Bologna, che opportunamente cambiato per il 7040 dell'Università di Milano, corregge i valori apparenti per la rifrazione e calcola, da tre osservazioni locali distanti almeno un minuto, gli elementi orbitali. Si sta mettendo a punto un programma che fornisca dalle osservazioni le effemeridi di un dato satellite per un periodo di tempo abbastanza lungo in modo da rendere indipendente l'Osservatorio dalle previsioni della NASA che spesso arrivano con ritardo. Sono in corso contatti con altri Osservatori Europei per l'osservazione contemporanea dei satelliti artificiali.

MANARA, A. 1966a, *Ist. Lomb. Sci. e Lettere (Rend. Sc.) A* **100**, 109-121.

MANARA, A. 1966b, *Ist. Lomb. Sci. e Lettere (Rend. Sc.) A* **100**, 181-190.

MAMMANO, A. 1961, *Space Res. II*, 115-156.

KRANJC, A. 1967, *Università Aquila, Boll.* **6**.

WHIPPLE, F. L. 1958, *Vistas in Astronomy*. Pergamon Press, England, 258-262.

