

Műholdak pályaparamétereinek és láthatósági jellemzőinek számolása zsebszámológéppel

DR. MOLNÁR JÁNOS
Gáz- és Olajszállító Vállalat
Műszaki fejlesztési Osztály

Az űrkutatás kezdeti, euforikus korszakából a gyakorlati alkalmazások területére jutott. Mintegy két évtized alatt az első műholdak eseményszámba menő komoly technikai-tudományos fejlődést bizonyító fel-lövéseitől mára már az amatőr rádiósok által is ru-tinszerűen használt műholdas összeköttetésekig ju-tottunk. A műholdas TV műsorszórás gyors térhó-dítása is csak az olcsó vevőkészülékek és antennák előállításától függ. Érdeemes tehát kissé közeleb-ből megismerkedni az égi mechanika néhány kiragadott fejezetével.

A fizikai-matematikai alapok áttekintése után megfigyelési – átjátszási feladatok megoldásához közvetlenül használható programot, útmutatót köz-lünk a PTK 1096 típusú zsebszámológépre.

1. Mozgás a centrális erőterben

Kepler, Newton majd mások munkássága révén vál-tak ismertté az alábbiakban röviden összefoglalt tudnivalók.

Az égitestek (így a műholdak) mozgása síkban lezajló, centrális erőterbeli. Az m_H tömegű holdra a mozgás közben ható

$$F = G \frac{m_F \cdot m_H}{R^2} \quad (1)$$

gravitációs vonzerőből származó potenciális és meg-szerzett kinetikus energiák összege, valamint a test impulzusnyomatéka állandó marad. E két megmara-dási tételből levezethető az ellipszis alakú pálya

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\cos E - \varepsilon}{1 - \varepsilon \cdot \cos E} \right\} \quad (2)$$

$$R = a(1 - \varepsilon \cos E) \quad (3)$$

paraméteres polárkoordinátás alakú egyenlete, vala-mint a periodikus mozgás átlagos körfrekvenciájára (periódusidejére) az

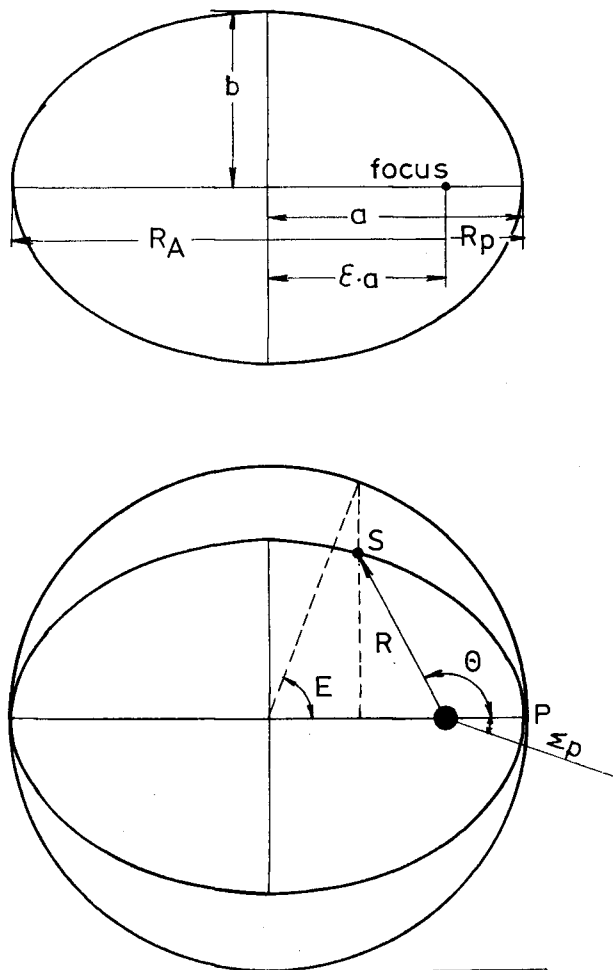
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 60 \cdot \sqrt{\mu \cdot a^{-3}} \quad (4)$$

kifejezés.

A fiktív elfordulásként is értelmezhető E paraméter geometriai jelentését az 1. ábra, számértékét (defi-nícióját) a t idő függvényében az

$$\omega(t - t_p) = E - \varepsilon \cdot \sin E \quad (5)$$

Kepler-egyenlet adja. t_p állandóként lépett be a moz-gásegyenlet integrálásakor. Fizikai jelentése a peri-



H744-1

1. ábra. Geometriai jellemzők a keringés síkjában

Beérkezett: 1980. V. 4.

geumponthoz kötött hely-koordináta és az időkoordináta kezdőpontjának összerendelése.

Az ellipszis mentén keringő hold helyzetét a Föld felszínéről figyeljük, így a magasságát is innen mérjük.

A Földhöz legközelebbi P pályapontot nevezzük perigeumnak (magassága H_P), míg a legtávolabbit apogeumnak (magassága H_A). Ezekkel fejezzük ki a fókuszponttól (Föld-középpontból) számított vezérsugar és egyéb geometriai jellemzők értékét:

$$a = \frac{H_A + H_P}{2} + R_F, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{H_A - H_P}{2a}. \quad (7)$$

A műhold keringési ideje és az ebből származtatható körfrekvencia csak a nagytenyely hosszától, illetve a természeti állandóktól függ a 4. képlet szerint!

A perigeumponttól mért τ idő és az E fiktív elfordulás közt az 5. képlet szerinti kapcsolat van, figyelembe véve, hogy

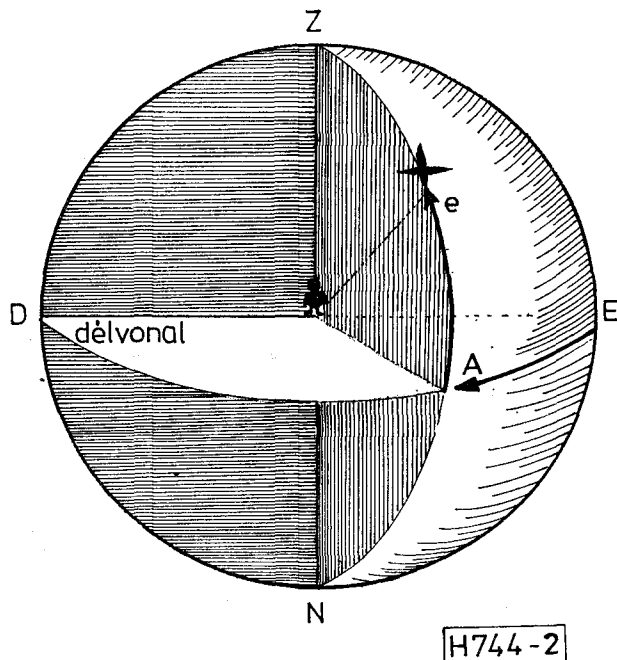
$$M = \omega\tau = \omega(t - t_P). \quad (8)$$

Ezek után elvileg ismertnek tekinthetjük a műhold-pálya síkbeli hely-idő függvényét. Az elvi ismeretet elsősorban azért kell kiemelni, mert a paraméteres forma és a fiktív elfordulás — paraméterre implicit függvény. Gyakorlatilag az alkalmazásnak két módja jöhet számításba:

- megfelelő sorfejtéssel explicitté tenni a hely-idő függvényeket, vagy
- számítógéppel, numerikusan végeztetni el a szükséges számításokat.

A sorfejtés közel körpályán keringő holdaknál használható, mert ekkor ε amúgy is kis értéke miatt gyors lesz a konvergencia, de nagyobb e esetén még a sorfejtés konvergenciája sem áll fenn. Körpályán keringő holdakra viszont a megoldás $\varepsilon=0$ értéke miatt nagyon leegyszerűsödhet.

Irodalmi forrásokból [1, 2] ismert, hogy a körpályán, vagy közel körpályán mozgó műholdak nyompontját, láthatósági és egyéb jellemzőit hogyan lehet számolni. Ezeknek a számításoknak a matematikai alapját az egyenletes körmozgás és a gömbi trigonometria alapegyenletei adják. A még szükséges számítások lényegében egyszerű alpműveletek. E számításokhoz már a kisebb zsebalkulátorok is eredményesen használhatók, ha legalább 10 memóriájuk és 72 lépéses programtárolójuk van [3]. A nagyobb kapacitásúak (HP 67/97, TI 58, PTK 1096 stb.) természetesen nagyobb kényelmet adhatnak, sőt az elliptikus pályák számítására is alkalmasak. A beépített egyenletmegoldó szubrutin ugyanis a 4. egyenlet kényelmes megoldási lehetőségét jelenti, s így a még szükséges egyéb számításokhoz marad elég memória. Ily módon a numerikus módszer (nem is nagyon rossz közelítéssel, l. alább) a hazai piacon is hozzáférhető zsebszámológépekkel könnyen elvégezhető.



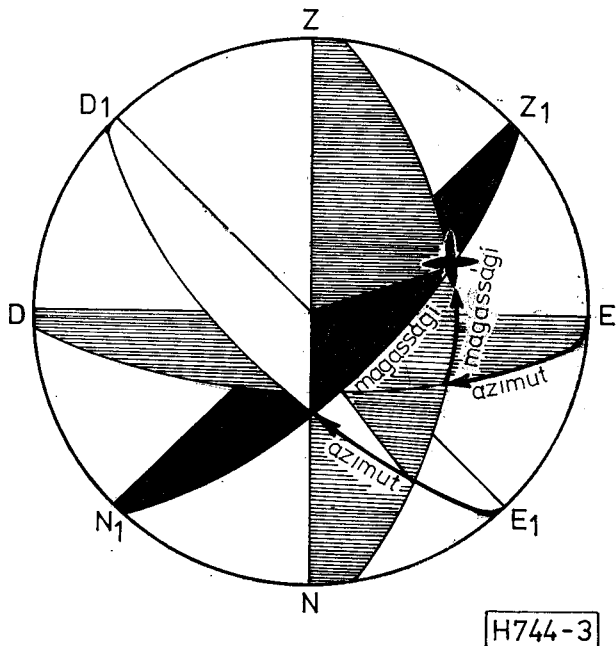
2. ábra. Mérés a horizontális rendszerben

2. Mozgás a térben

Az előzőekben csak a síkbeli feladatról volt szó. Az égitestek azonban a háromdimenziós térben mozognak. Ezért röviden ismerni kell a gyakorlati navigáció és csillagászati megfigyelések alapfeladatát, a koordináta transzformálásokat is.

A megfigyelő a saját helyén könnyen reprodukálható és „érzékeltető” koordinátarendben tudja leg egyszerűbben meghatározni az égitestek helyzetét. (2. ábra) E koordinátarendszer a horizontális rendszer, mely olyan gömbi koordináta hálózat, amelynek tengelye a zenit irányába mutat. Erre merőleges a helyi horizont síkja. Az égitest egyik koordinátáját a rendszerben a tengelyre és az égitestre illesztett, ún. vertikális síkban a zenittől (függőlegesből) mért zenittávolság, vagy ezt a szöveget 90° -ra kiegészítő e elevációs (más néven magassági) szög adja. További adatokat a testnek a kezdő ponttól mért D távolságával és a vertikális síkjának valamilyen kijelölt iránnyal bezárt szögével szokás megadni. A kijelölt irány rendszerint $E-D$ irányú, azaz illeszkedik a Föld forgástengelyére. Az irányítás megállapodás kérdése. A későbbiekben a térképekhez illeszkedően az északi iránytól Kelet felé forgó irányt tekintjük pozitívnak és A -val (azimut) jelöljük. Negatív azimut a nyugati irányú elfordulást jelenti, a délpont így $\pm 180^\circ$ -nak felel meg. Az $E-D$ irányú vertikális sík neve: meridián. A csillagászatban és a felsőgeodéziában szokásos a délponttól nyugat felé kiindulóan mért $0-360^\circ$ szögtartomány használata.

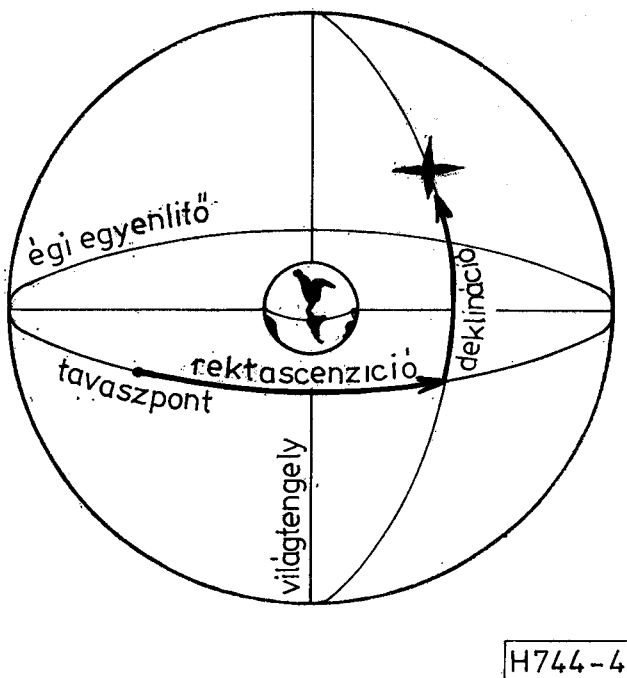
A horizontális rendszerben egy állócsillag elevációja és azimutértéke a Föld forgásából eredően állandóan változik. De különböző helyeken — egy időben — mért koordináták is eltérnek egymástól a földfelszín görbültsége miatt (3. ábra). Így a meg-



H744-3

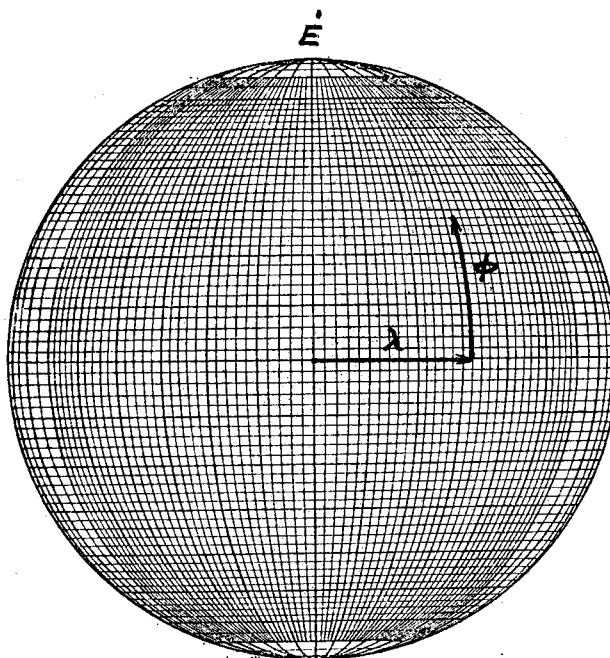
4. ábra. Mérés az ekvatoriális rendszerben

figyelési adatokon túl további három (két hely és egy idő) adat megadása szükséges. Ezt a hátrányt küszöböli ki az egyenlítői koordináta-rendszer (4. ábra). Ez a helyi horizontális rendszerrel szemben az égbolt látszólagos forgását követő, ugyancsak gömbi koordinátahálózat. Alapsíkja illeszkedik a földi egyenlítőre, ez az ekvátor. Erre merőleges tengely a világtengely, mely az északi (ill. déli) pólus irányába mutat. E körül forog a Föld. Az ekvátorban szögtávolságot a tavaszpont irányától mérünk. A ta-



H744-4

3. ábra. Helyfüggő koordináták a horizontális rendszerben



H744-5

5. ábra. Mérés a földrajzi rendszerben

vaszpont azt az irányt jelöli ki, amely felől március 21-én napéjegyenlőségkor látjuk a Napot, azaz ahol a Föld keringési síkja és egyenlítői síkja metszi egymást. A horizontális rendszerben mért elevációnak a deklináció, az azimutnak a rektascenzió felel meg — ha nem is közvetlenül, hanem értelmezés szerint.

A földrajzi térképhálózat koordináta-rendszere igen szoros kapcsolatban áll a csillagászat ekvatoriális rendszerével. Tengelyük és alapsíkjuk közös. Csak a kezdőpontok különböznek, no meg az elnevezések, az irányítások és az értelmezési tartományok.

A térképekről is ismert a greenwichi délkör (meridián) szolgál a keleti (+) vagy nyugati (-) hosszúság (λ) mérésének kezdőpontjául. Az egyenlítő felett „+”, alatta „-” szélességi (Φ) koordinátával adhatjuk meg a felszín valamely pontjának koordinátáját (5. ábra). Ha nem a Föld felszínén levő pont helyzetét kell megadni, akkor a ponthoz hozott vezérsugár hosszát és annak, a földfelszínnel alkotott dőlésponti koordinátáját szokás megadni.

Műholdak koordinátáit — nyugvó Föld feltételezésével — a pályasíkban mért egyenlítői felbukkanástól számított szögtávolság ismeretében számolhatjuk. A Föld tengelyforgását megfelelő korrekciós taggal lehet figyelembe venni.

A horizontális és ekvatoriális (földrajzi) koordinátákat természetesen a gömbi trigonometria összefüggéseiben (oldalak és szögek sinus, ill. cosinus tétele stb.) alapuló transzformációs formulák összekapcsolják. Ezek formája azonban igen változó. A navigációs feladatok kapcsán ugyanis sokan foglalkoztak ilyen jellegű számításokkal s munkájuk nem új alapegyenletek megalkotására irányult (ez nehezen lenne elképzelhető), hanem a szükséges számolások gyakorlati lebonyolítására, ésszerűsítésére, segéd-táblázatok kidolgozására.

Legújabbán — a zsebszámológépek elterjedésével — már olyan kis célgépeket, vagy cserélhető hardware szubrutinokat is lehet venni, amelyek a feladatorientált számolásokat (légi vagy tengeri navigálás stb.) másodperceken belül elvégzik.

Ezért most csak azok az összefüggések szerepelnek itt — kommentár nélkül —, amelyeket az antennavezérléshez, észleléshez szükséges horizontális rendszer és a pályaszámítás során alkalmazandó földrajzi (ekvatoriális) rendszer miatt ténylegesen felhasználunk:

$$\Phi_S = \arcsin \{ \sin i \cdot \sin \Sigma \} \quad (9)$$

$$\lambda_S = \operatorname{sgn}(\cos i) \cdot \arccos \left\{ \frac{\cos \Sigma}{\cos \Phi_S} \right\} - \frac{360}{T_F} t + \lambda_E \quad (10)$$

$$\Delta = \arccos \{ \sin \Phi_0 \cdot \sin \Phi_S + \cos \Phi_0 \cdot \cos \Phi_S \cdot \cos (\lambda_S - \lambda_0) \} \quad (11)$$

$$e = \arctg \left\{ \frac{\cos \Delta - \rho}{\sin \Delta} \right\} \quad (12)$$

$$|A| = \arccos \left\{ \frac{\sin \Phi_S - \sin \Phi_0 \cdot \cos \Delta}{\sin \Delta \cdot \cos \Phi_0} \right\} \quad (13)$$

$$D = \operatorname{sgn} e \cdot R \cdot \sqrt{1 + e^2 - 2e \cos \Delta} \quad (14)$$

$$e = \frac{R_F}{R} \quad (15)$$

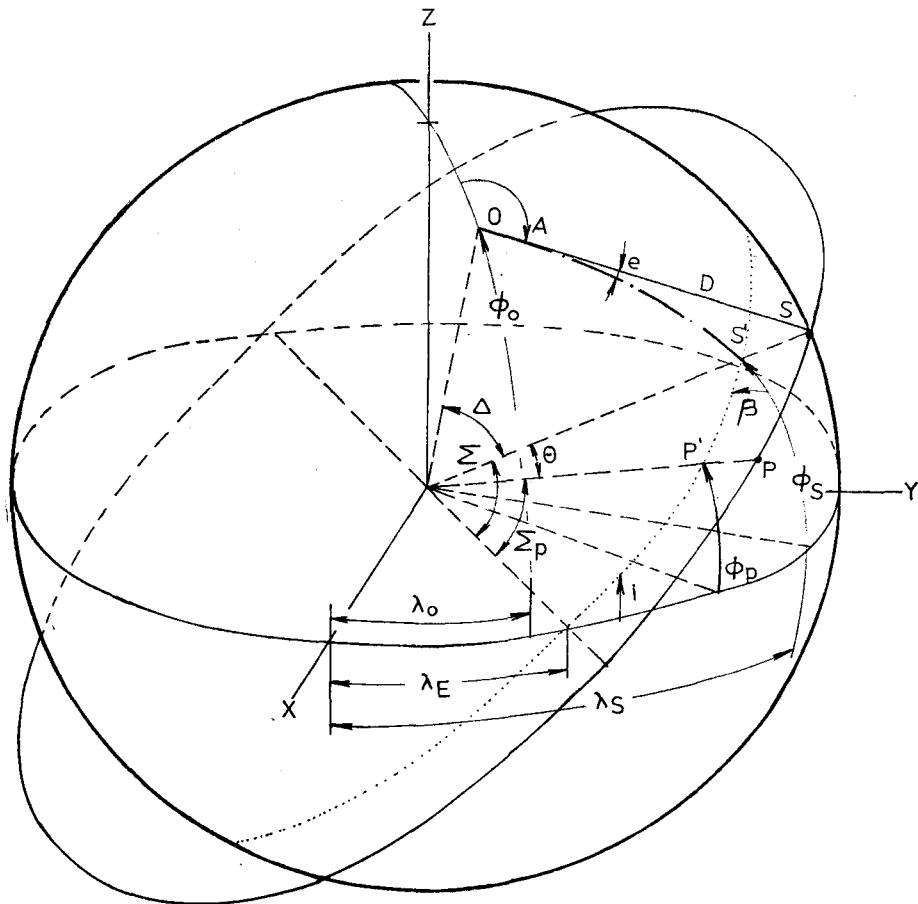
Az egyes mennyiségek jelölésére használt betűk választását az is indokolta, hogy a kézzel írott és a gép által nyomtatott jelölések lehetőleg azonosak legyenek. A térbeli mozgás jellemző mennyiségeit a 6. ábra szemlélteti.

A keringési síkban levő ellipszis helyzetét perigeumtájának földrajzi koordinátájával vagy az egyenlítői felbukkanástól mért szögtávolságával egyaránt meg lehet adni. Az előbbi módszer szemléletesebb: térkép segítségével könnyebb a földközeleli rohanás helyéről (azaz a kedvezőtlenebb észlelési körülményekről) tájékozódni. Az utóbbi a szokásos adatközlési mód. Ezért a programhoz alapadatként a szögtávolságra (Σ_P) van szükség, de mód van az ebből számított földrajzi koordináták (Φ_P , λ_P) szubrutin jellegű meghatározására. A visszatranszformáló formula

$$\Sigma_P = \arcsin \left\{ \frac{\sin \Phi_P}{\sin i} \right\} \quad (16)$$

Az előzőekben részletezett okok miatt a műhold helyzetét az egyenlítői felbukkanástól mért idő függvényében célszerű megadni, ugyanakkor a pályajellemzők a perigeumtól mért idő függvényében számolhatók egyszerűen. Ezért koordinátatranszformálásokat kell végezni:

$$E_P = \arccos \left\{ \frac{\varepsilon + \cos \Sigma_P}{1 + \varepsilon \cdot \cos \Sigma_P} \right\} \quad (17)$$



H744-6

6. ábra. Elliptikus holdpálya és a Föld, geometriai jellemzők a térben

TITLE Ellipszispálya és láthatósága

TI Programmable
Program Record 

PROGRAMMER Molnár DATE 80. VII. 25

Partitioning (Op 17) 6,3,9,3,9 Library Module ML-08 Printer (kejl) cards 3 blokk

PROGRAM DESCRIPTION

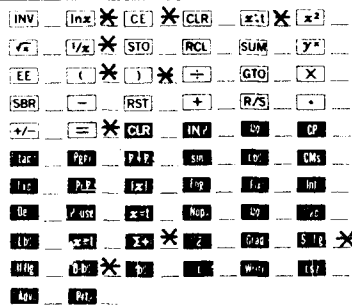
1 ←		→ 2		3 ←				→	
Subr.	P		Subr						
Adat	Δt	min	H,MS						

Algoritmus: szöveg szerint

TRIG DISP
 DEG FIX 2
 GRAD SCI
 RAD ENG

USER INSTRUCTIONS

STEP	PROCEDURE	ENTER	PRESS	DISPLAY
1	Programbeírás			
2	Adatbeadások	ϕ_0	A	ϕ_0
		λ_0	R/S	λ_0
		n	R/S	n
		H_A	R/S	H_A
		i	R/S	i
		ϵ_p	R/S	ϵ_p
		λ_E	R/S	λ_E
	(Elmaradhat)	T_E	R/S	T_E
	— n —		B'	(PRINT)
		Δt	B	0.00
3a	Időközellel számoltatás	t	C	(PRINT)
3b	Időponttal számoltatás	t*	D	(PRINT)

USER DEFINED KEYS	DATA REGISTERS (INV) (LST)	LABELS (Op 08)								
A *	00 M									
B *	1 vált.									
C *	2 ϵ_M									
D *	3 ΔE									
E	4 vált.									
A' *	5 vált.									
B' *	6 E									
C' *	7 vált.									
D' *	8 δ									
E'	9 vált.									
F *	0 *	1	2	3	4	5	6	7	8	9

H744-7

7. ábra. Program használati utasítása

$$t_p = \frac{E_p - \varepsilon \cdot \sin E_p}{\omega} \quad (18)$$

$$\Sigma = \Sigma_p + \Theta. \quad (19)$$

Valamennyi arcus függvényénél a többértékűség miatt a többi paramétértől függően a főértéket megfelelően korrigálni kell.

A Kepler-egyenletbe (5. összefüggés) az E fiktív elfordulást és a transzformált időt (M -et) radiánban kell helyettesíteni. Egyéb szögek, földrajzi koordináták fok egységgel használatosak, ezért további átalakításokat kell végezni.

3. Pálya-korrekciók

A centrális erőter homogén voltát s gömb alakú Földet tételeztünk fel hallgatólágosan az 1. képlet kapcsán.

Mivel a Föld tömegeloszlása nem homogén, alakja nem gömb, sőt ezek a jellemzők mégcsak nem is gömbszimmetrikusak, a Föld—műhold közt fellépő kölcsönhatások térben, időben változóak. Emiatt

a „síkbeli, elliptikus pálya” valójában bonyolult térbeli spirál. Szerencsére ezek az eltérések — éppen a műholdak pályájának pontos észlelési adataiból megállapítottan — nem túlságosan nagyok.

További zavarást okoz a felsőléggör és a műhold, illetve a napszél és a műhold kölcsönhatása. Előbbi perigeumpont környékén jelent fékezhetőást, az utóbbi az elnyúló pályák esetén stabilizálási gondokat okoz.

A Föld vonzóereje nemcsak ellipszis alakú pályára kényszeríti a műholdat, hanem ezt a pályát a saját síkjában elforgatja (a perigeum nyompontja körbejár a nyomvonalon) és magát a pályasíkot is körbeforgatja a Föld forgástengelye körül, sőt igyekszik azt az egyenlítő síkjába beforgatni.

OSCAR 9

i 57°

λ_E 0

ϕ_0 $47,5^\circ$ (Budapest)
 λ_0 $19,2^\circ$

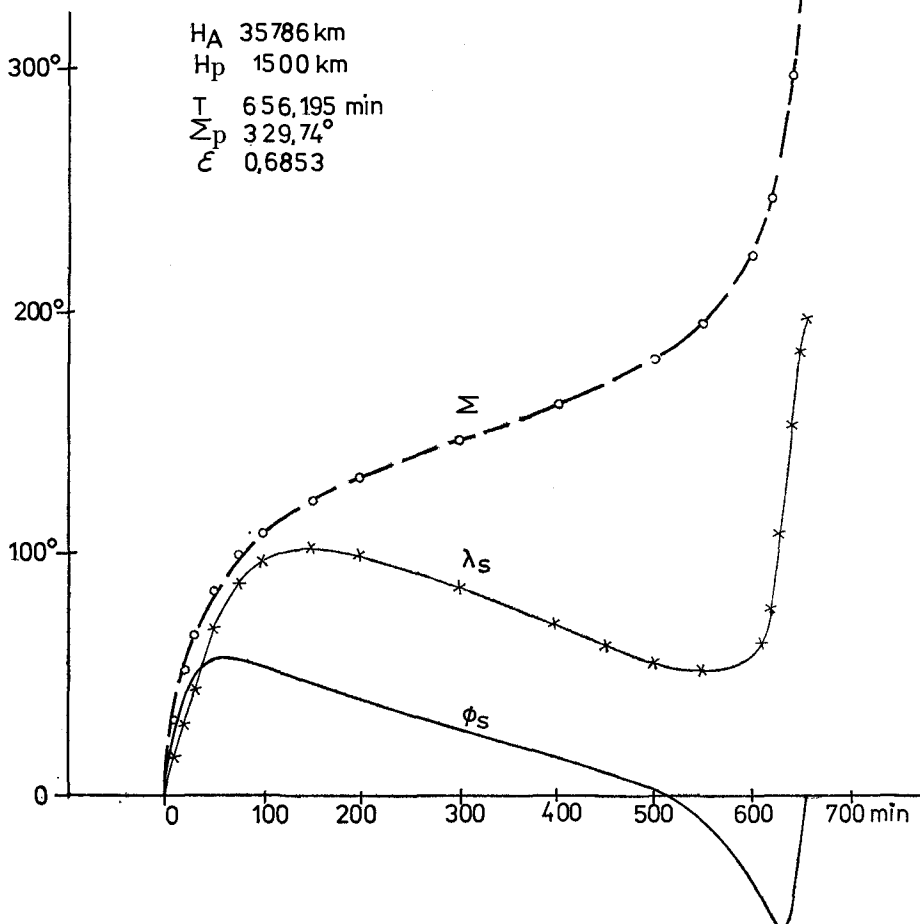
H_A 35786 km

H_p 1500 km

T 6 56,195 min

Σ_p 329,74°

ε 0,6853



H744-9

400.00	TIM	600.00	TIM
15.62	F	-34.47	F
69.27	L	56.07	L
51.96	Δ	88.38	Δ
30.20	e	-19.51	e
110.35	A	150.34	A
36799.13	D	-17667.24	D
161.27	Σ	222.44	Σ
40380.96	R	16659.71	R
		656.20	TIM
		0.00	F
		-164.49	L
		132.39	Δ
		-62.82	e
		5.01	A
		-13476.03	D
		0.01	Σ
		8332.85	R
		2.3000	
		150.00	TIM
		45.36	F
		101.27	L
		53.83	Δ
		26.42	e
		59.54	A
		30374.05	D
		121.95	Σ
		33695.03	R
		3.0000	
		180.00	TIM
		41.34	F
		100.03	L
		55.40	Δ
		25.55	e
		64.21	A
		33314.70	D
		128.03	Σ
		36517.28	R
		10.5612	
		656.20	TIM
		0.00	F
		-164.50	L
		132.39	Δ
		-62.82	e
		5.01	A
		-13476.02	D
		0.01	Σ
		8332.85	R

8. ábra. Nyomatási mintakép

9. ábra. OSCAR-9 pályae ellipszise

A sokféle hatásból kiragadottak ellenére már jó közelítésnek tekinthető, ha a pályajellemzőket az elsőrendű parciális deriváltak segítségével korrigáljuk. E korrekciós formulák:

$$B = \frac{J}{4} \left(\frac{1}{\frac{H_A}{R_{Fq}} + 1} + \frac{1}{\frac{H_P}{R_{Fq}} + 1} \right)^2 \quad (20)$$

$$T_\lambda = \frac{T}{B \cos i} \quad (21)$$

$$T_\Sigma = \frac{T}{\frac{1}{2} (5 \cos^2 i - 1) B} \quad (22)$$

$$\lambda_E = \lambda_{E0} \pm \frac{360^\circ}{T_\lambda} (t - t_{p0})_{-i > 63,5^\circ}^{+i < 63,5^\circ} \quad (23)$$

$$\Sigma_P = \Sigma_{P0} + \frac{360^\circ}{T_\Sigma} (t - t_{p0}) \quad (24)$$

Ezeket a képleteket a program nem veszi figyelembe, a hosszabbtávú (40–60 nap) előrebecsléseknél manuálisan kell feldolgozni őket.

A térbeli spirálszerű mozgás miatt a periódusidő értelmezése is pontosításra szorul. A 4. képletben szereplő (és a program által kezelt) periódusidő (T) két egymást követő perigeumponthi áthaladás időkülönbsége. Ezt anomális periódusidőnek szokás nevezni. Az egymást követő egyenlítői felbukkanások időköze a T nodális periódusidő. Kapcsolatukat a

$$T_N = T \left[1 - J \frac{5 \cos^2 i - 1}{2} \left(\frac{R_{Fq}}{a} \right)^2 \right] \quad (25)$$

egyenlőség fejezi ki. Mithogy eltérésük csekély, megegyezésük feltételezése megengedhető.

4. Megjegyzések a programhoz

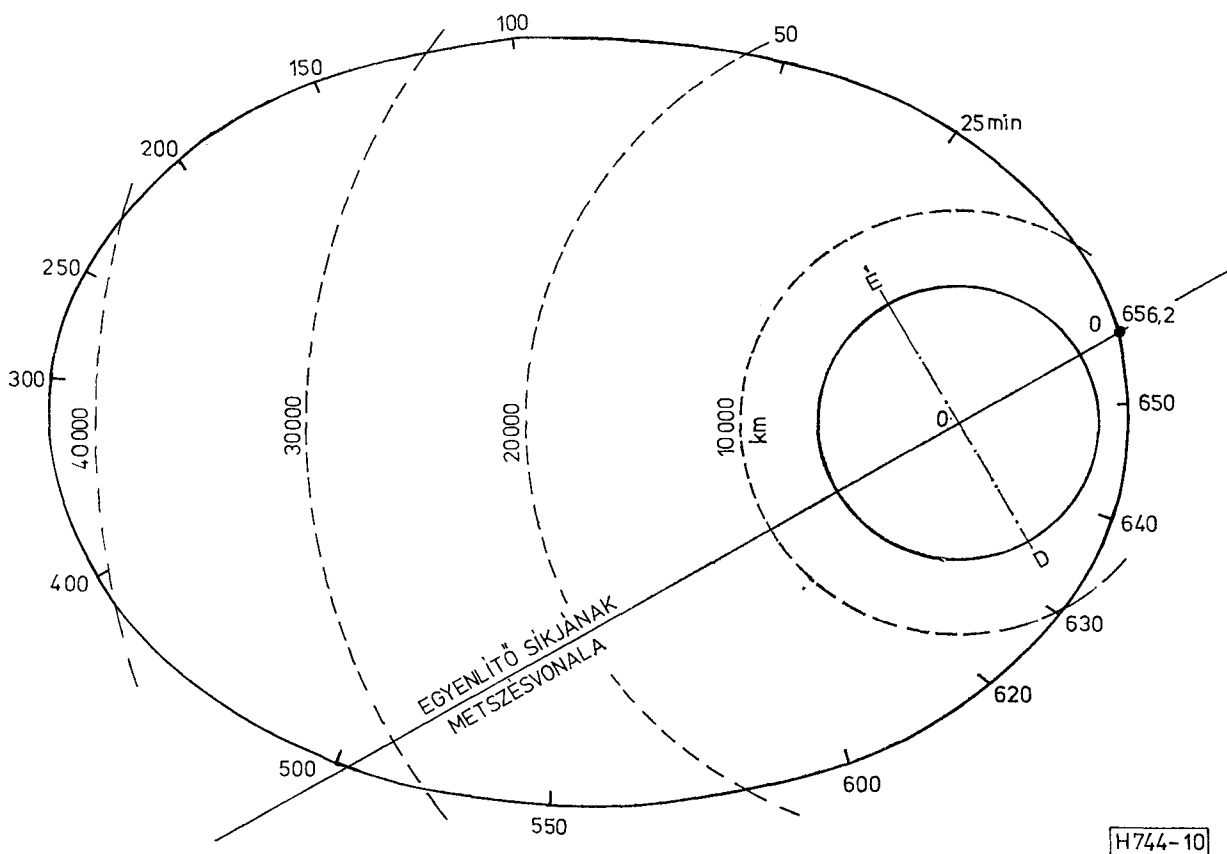
Az előző fejezetekben ismertetett képleteket felhasználó program utasításlistája az 1. táblázatban látható, kezelése a 7. ábrán:

Az A címkével kezdődő szegmens fogadja, tárolja és közben feldolgozza a bemenő adatokat. A megfigyelőhely földrajzi koordinátáinak beadása után net, a Kepler-egyenlet megoldásának pontosságát (és időszükségletét) meghatározó számot kell beírni. 3 tizedes jegy pontosság még elfogadható hibakorlátot és kb. 1 perces számolási időt jelent. 1-1 tizedes-jegy kb. 20 másodperccel változtatja a ciklusidőt. 5-nél nagyobb szám beadása már nem jelent érdemi pontosságnövekedést.

Az 5. egyenlet gyökére és a gép által számolt közelítő gyökre igaz lesz:

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot 10^{-n} \geq |f(E_{\text{gyök}}) - f(E_{\text{köz}})| \quad (26)$$

A továbbiakban a gömbalakúnak feltételezett Föld ($R_F = 6371$ km) feletti apogeum és perigeum távolságokat, majd a pálya egyéb jellemzőit kell folyamatosan R/S utasításokkal beírni. $H_A = H_P$ esetén körpályát lehet számolni.



10. ábra. OSCAR-9 nyomponthi koordinátái

TITLE _____

1 OF 4

TI Programmable
Coding Form



PROGRAMMER _____

DATE _____

LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS						
000		L.SL		055		7	L	110		*							
1		A'				SBR				RCL							
2		C				(				.22			
3		STO				7				=	M						
4		09				5	Δ			STO							
5		SIN				SBR				00							
6		#				(				1x1			
7		RCL				5				EXC							
8		20				4	e			00							
9		-				SBR				OP							
0		RCL				(				10			
1		09				7				STO							
2		+				3	A			2G							
3		RCL				SBR				CLR							
4		00				(				STO			
5		)	f(E)			1				01					
6		RTN				6	D			RAD							
017		LBL				SBR				PQM							
8		(				(				OR	
9		OP				7				E	E=....						
0		04				7	E			COS							
1		RC*				SBR				#							
2		23				(				RCL			
3		OP				3				20							
4		06	NYOMTAT			5	R			-							
5		OP				SBR				1							
6		00				(=							
7		CLR				ADV				+/-							
6		1				RTN				STO							
9		SUM		084		LBL				38							
0		2R				X≠±				+							
1		LBL				RCL				(
2		=				18				RCL							
3		RTN				SUM				06							
034		LBL				30				COS							
5		D'				RCL				-							
6		3				30	t=tat			RCL							
7		0				RTN				20							
8		STO		09		LBL				=							
9		28				G				1/X							
0		FIX				STO				INV							
1		02				30				COS							
2		3				÷				STO							
3		7	T			RCL				27							
4		2				17				π							
5		4	I			=				X≠T							
6		3				INV				RCL							
7		0	M			INT				06							
8		SBR				*				INV							
9		(				RCL				GE			
0		2				17			159								
1		1	F			-			MERGED CODES								
2		SBR				RCL			62	Pgm	Inc	72	STO	Inc	83	GTO	Inc
3		(24			63	Inc	Inc	73	RCL	Inc	84	FD	Inc
4									64	Inc	Inc	74	SUM	Inc	92	INV	SBR
054		2		408		=			TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED								

TITLE _____

2 of 4

TI Programmable
Coding Form



PROGRAMMER _____

DATE _____

LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS
160		CE		215		=	π	270		-	
1		π		1		STO		1		RCL	
2		*		2		37		2		30	
3		2		3		SIN		3		*	
4		-		4		*		4		2	
5		RCL		5		RCL		5		5	
6		27		6		14		6		0	
7		=	\odot	7		SIN		7		6	
8		STO		8		=		8		8	
9		27		9		INV		9		4	
170		LBL		5		SIN	ϕ_s	0		4	
1		CE		6		STO		1		=	λ_s
2		RCL		7		31		2		STO	
3		27		3		RCL		3		32	
4		*		9		37		4		(
5		1		0		COS		5		CE	
6		8		1		+		6		-	
7		0		2		RCL		7		RCL	
8		\div		3		31		8		11	
9		π		4		COS		9)	
0		=		5		=		0		COS	
1		PRD		6		INV		1		*	
2		26	\odot	7		COS		2		RCL	
3		DES		8		STO		3		31	
4		RCL		9		32		4		COS	
5		21		0		1		5		*	
6		PRD		1		8		6		RCL	
7		38	R	2		0		7		10	
8		RCL		3		XZT		8		COS	
9		19		4		RCL		9		+	
0		\div		5		37		0		RCL	
1		RCL		6		INV		1		31	
2		38		7		GE		2		SIN	
3		=	ϕ	8		)		3		*	
4		STO		9		RCL		4		RCL	
5		39		0		32		5		10	
196		LBL		1		+/-		6		SIN	
1		$\Sigma+$		2		+		7		=	
2		RCL		3		3		8		STO	
3		12		4		6		9		28	
4		+		5		0		0		INV	
5		RCL		6		=		1		COS	Δ
6		26		7		STO		2		STO	
7		=		8		32		3		33	
8		+		9		LBL		4		(
9		3		0	259	)		5		RCL	
0		6		1		RCL		6		28	
1		0		2		32		7		-	
2		=		3		*		8		RCL	
3		INV		4		RCL		9		39	
4		INT		5		25		319		39	
5		*		6		=		MERGED CODES 62 [Fm] [nd] 72 [STO] [nd] 83 [GTO] [nd] 63 [LCL] [nd] 73 [RCL] [nd] 84 [SI] [nd] 64 [m] [nd] 74 [SUM] [nd] 92 [INV] [SR]			
6		3		7		+		TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED			
7		6		8		RCL		TI-24151			
214		0		269		13					

TITLE _____

3 OF 4

TI Programmable
Coding Form



PROGRAMMER _____

DATE _____

LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	
320		)		325		33		430		23	
1		÷		2		SIN		1		=		
2		RCL		3		=		2		CP		
3		33		4		INV		3		GE		
4		SIN		5		COS	IAI	4		STF		
5		=		6		STO		5		+		
6		INV		7		35		6		2		
7		TAN	e	8		SBR		7		4		
8		STO		9		3'		8		=		
9		34		0		IFF		434		LBL		
0		(		1		00		0		STF	
1		1		2		=		1		*		
2		+		3		NOP		2		6		
3		RCL		4		SBR		3		0		
4		39		5		X2T		4		=	t	
5		X2		6		IFP		5		GTO		
6		-		7		01		6		C		
7		2		8		DMS		442		LBL		
8		*		9		GTO		8		A		
9		RCL		0		C		9		STO	φ.	
0		39		395		LBL		0		10		
1		*		1		DMS		1		R/S		
2		RCL		2		INV		2		STO	λ.	
3		28		3		FIX		3		11		
4		)		4		÷		4		R/S	
5		√		5		6		5		STO	n	
6		*		6		0		6		08		
7		RCL		7		+		7		+/-		
8		38		8		RCL		8		INV		
9		*		9		23		9		LOG		
0		RCL		0		=		0		+		
1		39		1		+		1		2		
2		OP		2		2		2		STO		
3		10		3		4		3		03		
4		=	D	4		=		4		=	δ	
5		STO		5		INV		5		EXC		
6		36		6		INT		6		08		
7		(		7		*		7		R/S	
8		RCL		8		2		8		STO	HA	
9		37		9		4		9		15		
0		SIN		0		=		0		STO		
1		-		1		INV		1		20		
2		RCL		2		DMS		2		STO		
3		28		418		LBL		3		21		
4		*		3		D		4		R/S		
5		RCL		4		STF		5		STO	HP	
6		10		5		01		6		16		
7		SIN		6		FIX		7		INV		
8		)		7		04		8		SUM	
9		+		8		PRT	t*	479		20		
0		RCL		9		STO		0		MERGED CODES		
1		10		0		29		62	21	IPD		
2		COS		1		DMS		72	STO	20		
3		÷		2		-		63	LOC	IPD		
4				3				73	RCL	IPD		
5				4				64	210	IPD		
6				5				74	SUM	INS		
7				6				83	GTO	IPD		
8				7				84	OP	INC		
9				8				92	INV	SBR		
374		RCL		429		RCL						

© 1977 Texas Instruments Incorporated

TI-24151

TITLE _____

4 OF 4

TI Programmable
Coding Form



PROGRAMMER _____

DATE _____

LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS
480		SUM		535		STO	Ep	590		24	
1		21		1		12				-	
2		3		2		*				RCL	
3		INV		3		π				20	
4		PRB		4		÷				*	
5		20		5		1				RCL	
6		INV		6		8				24	
7		PRB		7		0				SIN	
8		21		8		=	Ep)	
9		6		9		STO				÷	
0		3		0		24				RCL	
1		7		1		RAD				22	
2		1	RF	2		COS				=	Ep
3		STO		3		+				STO	
4		19		4		RCL				24	
5		SUM		5		20				DEG	
6		21		6		=				6	
7		RCL		7		÷)	
8		21		8		(				3	
9		INV		9		1				STO	
0		PRB		0		+				02	
1		20		1		RCL				RCL	
2		YX		2		20				12	
3		1		3		*				R/S	
4		)		4		RCL				STO	2E
5		5		5		24				12	
6		+/-		6		COS				RTN	
7		*		7		=			617	LBL	
8		3		8		INV				LNX	
9		7		9		COS				STO	TE
0		8		0		STO				23	
1		8		1		24				DMS	
2		1	60V _{AC}	2		1				EXC	
3		=	ω	3		8				23	
4		STO		4		0				RTN	
5		22		5		X ² T			625	LBL	
6		1/X		6		RCL				B'	
7		*		7		12				STF	
8		π		8		INV				00	
9		*		9		GE				GTO	
0		2		0		1/X				S+	
1		=	T	1		RCL			631	LBL	
2		STO		2		24				B	
3		17		3		+/-				STO	
4		R/S		4		+				18	
5		STO	i	5		2				INV	
6		14		6		*				STF	
7		COS		7		π				00	
8		OP		8		=	Ep			CLR	
9		10		9		STO			639	RTN	
0		STO		0		24					
1		25		1		586					
2		RCL		2		LBL					
3		14		3		1/X					
4		R/S		4		(
534				589		RCL					

MERGED CODES

62	Arg	Inv	72	STO	Inv	83	GTO	Inv
63	Arg	Inv	73	RCL	Inv	84	OP	Inv
64	Arg	Inv	74	SUM	Inv	92	INV	Scr

TEXAS INSTRUMENTS
INCORPORATED

TI-24151

© 1977 Texas Instruments Incorporated

Jelölések

Jel	Egység	Megnevezés
A	fok	Azimut, irányszög
a	km	nagytengety fele
B	—	paraméter
D	km	megfigyelő—hold közti távolság
E	rad	paraméter (fiktív elfordulás)
E_P	rad	perigeumhoz tartozó paraméter
e	fok	eleváció, magassági szög
H_A	km	apogeum magassága
H_P	km	perigeum magassága
i	fok	inklináció, pályahajlászög
M	rad	paraméter, átlagos fiktív elfordulás
n	—	az 5. egyenlet gyökének pontossági jellemzője
R	km	távolság a fókuszról
T	perc	anomalisztikus keringési periódusidő (számított)
T_E	HH, MMSS	egyenlítői felbukkanás időpontja
T_N	perc	nodális periódusidő
T_λ	perc	pályasík periódusideje
T_Σ	perc	pályaforgás periódusideje
t^*	HH, MMSS	időpont
t	perc	idő (egyenlítői felbukkanástól)
t_P	perc	perigeumpont időtávolsága az egyenlítői felbukkanástól
Δt	perc	időköz
σ	—	hibakorlát
ε	—	excentricitás
Θ	rad, fok	elfordulás (perigeumponttól mérve)
Δ	fok	megfigyelő—holdnyom közti ívszög

Jel	Egység	Megnevezés
λ_E	fok	egyenlítői felbukkanás földrajzi hosszúsága
λ_S	fok	holdnyom földrajzi hosszúsága
λ_0	fok-	megfigyelőhely földrajzi hosszúsága
ρ	—	paraméter
Σ	fok	elfordulás (egyenlítői felbukkanástól)
Σ_P	rad, fok	perigeumpont szögtávolsága az egyenlítői felbukkanástól
τ	perc	idő (perigeumponttól mérve)
Φ_S	fok	holdnyom földrajzi szélessége
Φ_0	fok	megfigyelőhely földrajzi hosszúsága
ω	$\frac{\text{rad}}{\text{perc}}$	körfrekvencia

3. táblázat

Állandók

Jel	Egység	Megnevezés
R_F	6371,0	km Föld sugara (átlagos)
R_{Fq}	6378,2	km Föld egyenlítői sugara
T_F	$23^{\circ}56^m4^s$	Föld forgásideje
ω_F	0,250684	$\frac{\text{fok}}{\text{perc}}$ Föld szögsebessége
μ	398603	$\frac{\text{km}^3}{\text{s}^2}$ Geocentrikus gravitációs állandó ($G \cdot m_F$)
J	$1,627 \cdot 10^{-3}$	Sorfejtési együttható

A földrajzi koordinátákat és egyéb szögeket fok és decimális törtrészei alakban kell betáplálni, az eredmények is ilyen alakúak.

Az egyenlítői felbukkanás T_E időpontját HH, MMSS alakban lehet beírni — ha ismert vagy szükséges. El is maradhat ez a beírás. Ilyenkor a program $T_E=0$ értéket vesz figyelembe és lényegében a percekben mért időt óra, perc, másodperc alakúvá transzformálja. Egyébként a valós időt adja, ill. nyomtatja.

Ha ezek után a B' címkével utasítjuk a gépet, kb. 1 perc múltán a perigeumpontra vonatkozó adatokat kaphatjuk. Ez a rész is kimaradhat.

Szükséges viszont még a számítási időpontokat

$$t = \sum_0^{\Delta t} \Delta t \quad (27)$$

összefüggés alapján meghatározó Δt beadása a B címkével. Ezt a műveletet igényeknek megfelelően többször is végre lehet hajtani különböző Δt értékekkel.

A tényleges (ciklikus) számolásokat a t kezdő idő megadása után a C címkével, vagy a t^* kezdőidőpont HH, MMSS alakú beírása után a D címkével lehet indítani. Az indítástól függően vagy a teljes kimenő adatsor (a 30—38 memóriák tartalma) ki-nyomtatódik vagy ezeket megelőzően még az aktuális időpont is HH, MMSS formában. A nyomtatás-kép egyébként Fix2, amit ugyan fel lehet váltani bármely más kijelzési móddal, de ilyenkor a jobb-oldali szövegrész értelmetlen jelsorrá válhat (az eredmények és sorrendjük helyes marad).

A ciklus bármikor leállítható R/S utasítással, de újabb indítás (adatbeírás) előtt $RST CLR$ utasításokról nem szabad megfeledkezni.

Nyomatató nélküli használat esetén célszerű a nyomtatásvezérlő D' szubrutin helyére $RLC 30$ utasítást és az utána levő Nop helyére R/S utasítást írni. Eredménylehíváshoz ilyenkor természetesen többszörös $RCL ..$ utasítás kell. A számolások vég-eredményei a 29—39. memóriákban vannak, míg egyéb adatok a 7. ábra szerint. A ciklus R/S utasítással folytatható.

Nyomatási mintakép a 8. ábrán, míg egy műhold-ra vonatkozó számítások grafikus képe a 9. és 10. ábrán látható.

A teljes program az 1. táblázat szerinti.

Az alkalmazott fontosabb mennyiségek jelölése, rövid definíciója a 2. és 3. táblázatokban van.

A témával foglalkozó (és az OMKDK-ban hozzáférhető) irodalmakban további részletkérdésekre [4], általános ismertetésekre [5] számíthat az olvasó.

IRODALOM

- [1] D. C. Mitchell: HP-67/97 tracks communications satellites. Electronics/March 1, 1979.
- [2] Dr. Gschwindt A.: Közvetlen műsorszórás műholdakkal. Rádiótechnika Évkönyve. Budapest, 1980.
- [3] Dr. Molnár J.: Műholdak pályaszámításai. Rádiótechnika, 1980. V., VI.
- [4] Gotland: Telecommunications satellites. Iliffe Books Ltd. London, 1964.
- [5] W. Schmid—V. Borsdorf: Sphärische trigonometrie. Freiberg, 1959.