

**PENENTUDUDUKAN DENGAN GPS : STATUS SISTEM MASAKINI \*  
DAN JANGKAAN KETEPATAN PENGUKURAN**

oleh

Dr. Ayob bin Sharif Jabatan  
Geodesi dan Astronomi,  
Fakulti Ukur. Universiti  
Teknologi Malaysia.

**Abstrak**

Penulisan ini memberi maklumat ringkas berkenaan status sistem GPS masakini setakat yang diketahui dan membincangkan faktor-faktor yang membatkan ketepatan pengukuran untuk penentududukan. Perbincangan termasuk Jangkaan ketepatan menggunakan kaedah pengukuran dan penggunaan kod, keperluan orbit satelit, serta kesan-kesan bias sistem GPS yang menghadkan ketepatan pengukuran.

**I.O Pengenalan**

Penggunaan "Global Positioning System" (GPS) dalam kerja-kerja penentududukan sudah mula meluas dalam berbagai bidang seperti geodesi dan geodinamik. Sistem penentududukan yang menggunakan satelit-satelit angkasa lepas ini sedang dikenakan oleh "Department of Defense" (DOD) Amerika Syarikat bagi mengantikan sistem TRANSIT. Matlamat utama GPS dimajukan lalu untuk kegunaan ketenteraan Amerika Syarikat dan juga negara-negara pakatan NATO bagi membuat penentududukan masa-hakiki (real-time) yang berkejadian tinggi di darat, udara dan laut. Kegunaan ketenteraan termasuk pandu arah (navigation), memperolehi sasaran (target acquisition) untuk peluru berpandu, mengesan dan mengawas letusan nuklear, dsbnya. Bagi penggunaan awam pula, tujuan utama GPS lalu untuk pandu arah. Hasil daripada eksperimen dan penyelidikan yang dilakukan oleh ahli-ahli geodesi, pengukuran dengan sistem GPS telah terbukti mampu memberi penentududukan berjitu tinggi yang sesuai dilakukan dalam bidang ukur geodesi dan geodinamik.

Penerangan berkenaan sistem ini terdapat dalam banyak terbitan yang berkait dengan bidang ukur dan geodesi. Pembaca perlu diingatkan bahawa masakini sistem GPS ini masih lagi dalam perlengkap eksperimen lagi. Oleh itu terdapat beberapa perubahan tentang penerangan sistem tersebut dalam artikel-artikel yang telah diterbitkan.

Dalam perancangan awal, konstilasi satelit yang dirancangkan akan lengkap dalam tahun 1988 telah tergantung oleh bencana Challenger pada bulan Januari 1986 dulu. Pihak yang berkuasa yang membangunkan sistem ini, DoD, telah mengkaji semula bilangan satelit untuk konstilasi yang muktamad. Pada awal tahun 1989 keputusan telah dilambil untuk meletakkan 21 buah satelit yang beroperasi, dan ditambah 3 buah satelit simanpan yang aktif, Ayob Sharif, 1989. Kedudukan sebenar satelit di orbit dalam konstilasi yang muktamad nanti, terutama kecondongan dan satah, tidak dapat dipastikan samaada mengikut perancangan awal, sebagaimana yang terdapat dalam banyak penerbitan GPS akan dikekalkan. Masakini pihak DoD masih lagi menimbangkan untuk melaksanakan konstilasi 24 buah satelit ditambah buah 3 satelit simanpan. Tujuannya ialah untuk memberi gabungan sekurang-kurangnya 4 buah satelit yang baik dari segi geometri pada bila-bila masa untuk penentududukan tepat di seluruh tempat di muka bumi.

Artikel Ini telah diterbitkan dalam Journal "The Surveyor" Vol.  
25 No. 2. pp. 58-61.

## **2.0 Status Satelit Masakini**

Walaupun masih terdapat beberapa buah satelit Block I memberi signal yang baik, kebanyakan dari satelit tersebut sudah berada di orbit melebihi dari jangka usia operasinya (life span), iaitu 5 tahun. Masakini, pihak yang berkuasa sedang mempergatkan pula pelancaran satelit generasi kedua, iaitu Satelit Block II. Setelah perlaksanaan sistem GPS ini lama tergendala, pada bulan November tahun 1988 barulah satelit Block II yang pertama (SV14) dihantar ke orbit. Sejak bulan Jun 1989 hingga tarikh penulisan ini (Januari 1989), empat buah lagi satelit Block II telah dihantar ke orbit. Terakhir sekali satelit GPS dilancarkan ialah pada bulan November yang lalu, iaitu SV17.

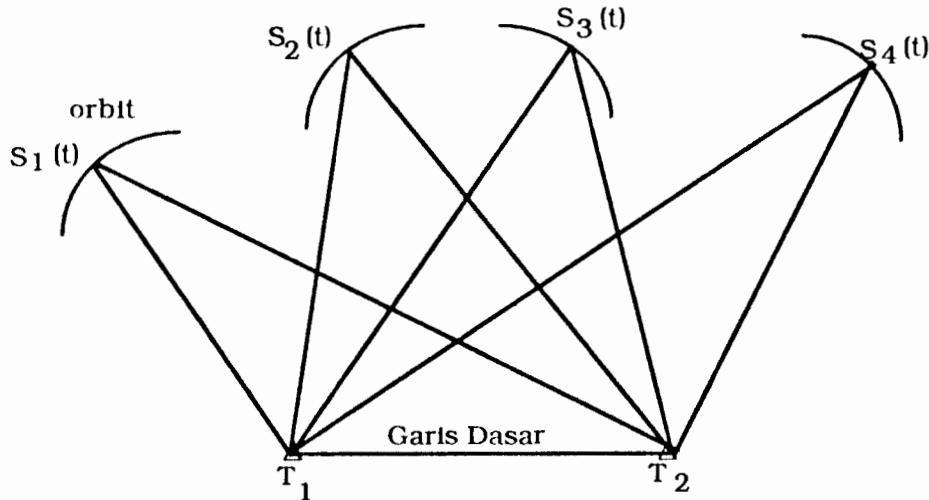
Masakini pelancaran satelit GPS tidak lagi bergantung kepada misi kapal angkasa Shuttel, malah dimasa akan datang lebih banyak satelit akan dilancar menggunakan roket DELTA II. Bilangan satelit GPS yang boleh dijejak (tracked) masakini ialah 11 buah satelit kesemuannya, iaitu lima satelit Block II (SV2, SV14, SV16, SV17 dan SV19) dan 6 buah satelit Block I (SV3, SV6, SV9, SV11, SV12 dan SV13). Pengguna GPS perlu mengawasi bahawa SV8 masih berfungsi lagi, tetapi tidak boleh digunakan untuk penentududukan jitu kerana satelit tersebut hanya membawa jam yang menggunakan osillator kristal quartz. Tingkap cerapan satelit GPS di Malaysia masakini melebihi 10 jam, lihat Jadual I. Walau bagaimanapun untuk menghasilkan penentududukan yang baik, pemilihan satelit bergantung kepada geometri rangkaian satelit yang digunakan, iaitu hasil analisis GDOPnya (Geometrical Dilution of Precision). Masakini sesi cerapan di Malaysia terhad lebih kurang 4 hingga 5 jam sahaja bagi setiap putaran satelit (kira-kira 12 jam).

## **3.0 Penentududukan dengan GPS**

Sistem GPS boleh memberi kedudukan titik dalam 3-dimensi dengan membuat cerapan serentak kepada 4 satelit. Prinsip pengukuran GPS ada kesamaannya dengan kaedah penentududukan silangalik (resection). Jika menggunakan kaedah silangalik kodinet titik-titik kawalan diketahui terlebih dahulu. Penentududukan dengan GPS pula memerlukan kedudukan satelit yang tepat disetiap epok cerapan ( $t$ ), lihat gambarajah 1. Oleh kerana masa ( $t$ ) tidak diketahui, 4 satelit perlu dicerap serentak untuk menyelesaikan 4 parameter ( $x, y, z, t$ ) yang diingini. Apabila menggunakan sistem GPS, penentuan masa dengan tepat amatlah penting kerana selisih menentukan masa akan didarab dengan kelajuan cahaya,  $c$  ( $2.99792459 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ), untuk memberikan selisih vektor jarak yang diukur. Vektor jarak diperlukan untuk menghitung kodinet titik cerapan. Selisih sistem waktu juga perlu diawasi dalam menentukan masa. Ini ialah kerana alatpenerima (receiver) dan satelit mempunyai jam dan sistem masa yang berlainan. Alatpenerima biasanya menggunakan waktu UTC, manakala satelit pula menggunakan waktu GPS. Waktu GPS bermula pada 6hb. Januari 1980 dan dikawal dengan jam-jam atom yang berasingan dari jam-jam atom yang mengawal waktu UTC. Waktu GPS menggunakan unit saat dan minggu sahaja. Perbezaan waktu GPS dengan UTC juga terdapat dimana saat lompat (leap second) bagi waktu GPS tidak dibetulkan seperti mana waktu UTC.

Penentududukan dengan GPS boleh dilaksanakan melalui dua kaedah utama (primary): pengukuran jarak-samu (pseudo-range), biasanya digunakan untuk pandu arah, dan pengukuran fasa pembawa (carrier phase) untuk penentududukan jitu. Pengukuran jarak-samu adalah pengukuran vektor jarak yang tercemar (contaminated), dalam bentuk masa yang diambil oleh signal satelit sampai ke alatpenerima didarab dengan  $c$ . Ini ialah kerana signal satelit yang sampai ke alatpenerima telah dicemari oleh berbagai jenis selisih seperti kesan lengah troposiar dan ionosiar dan selisih pengukuran waktu.

Lain-lain kaedah pengukuran, seperti kaedah Bilangan Doppler Bersepadu (Integrated Doppler Count) dan kaedah Interferometri diperolehi daripada pengukuran utama GPS. Dengan pengukuran jarak-samu, kedudukan serta-merta titik boleh didapati melalui penggunaan kod siaran (broadcast code) untuk penentududukan absolut atau titik, manakala dengan pengukuran fasa beat pembawa pula, pengguna GPS boleh membuat penentududukan relatif yang jitu. Kaedah yang kedua ini, pada prinsipnya, tidak memerlukan kod siaran. Untuk peringatan, penentududukan relatif dalam kontek ini ialah kaedah untuk mendapatkan perbezaan kodinet dua atau lebih kedudukan alatpenerima (titik pusat antena) yang menjelak (tracking) satelit-satelit dengan serentak.



Gambarajah 1 : Penentududukan Relatif

#### 4.0 Ketepatan Penentududukan

Banyak faktor mempengaruhi ketepatan penentududukan dengan GPS, seperti kaedah pengukuran, kejituuan alat, ketidakpastian orbit satelit, selsih-selsih yang mempengaruhi pengukuran, dsbnya. Sebagai yang diterangkan di bahagian 3.0, pengukuran Jarak-samu menggunakan kod siaran untuk menerima signal daripada satelit. Walau pun ketepatan pengukuran dengan kaedah ini adalah kurang dari kaedah pengukuran fasa pembawa, daripada eksperimen yang telah dilaksanakan terbukti kaedah jarak-samu juga mampu memenuhi setengah keperluan jika jumlah data cerapan mencukupi untuk tujuan yang tertentu seperti penentuan orbit, Anderson and Hauge (1989).

Dalam bahagian seterusnya dibincangkan secara ringkas faktor-faktor yang terlibat dalam menentukan ketepatan penentududukan dengan GPS masakini. Pengguna sistem ini juga perlu mengambil perhatian bahawa ketepatan penentududukan masa-hakiki bagi kegunaan awam akan diturunkan (degraded) ketahab 100 m apabila konstilasi satelit sudah lengkap kelak melalui skim yang dinamakan "Selective Availability" (SA), Wells et al (1986). Perlaksanaan SA ini adalah dijangkakan pada pertengahan tahun 1992.

#### 4.1 Penggunaan Kod

Struktur signal GPS adalah sangat rumit untuk dibincangkan dalam penulisan ini. Pada asanya ia menggunakan kod hingar rambang-samu (Pseudo-random noise code), iaitu susunan binari yang mengandungi rangkaian 0 dan 1 yang bersiri untuk menghantar maklumat kepada pengguna. Bagi tujuan penentududukan, maklumat yang diperlukan adalah seperti esemeris satelit, maklumat masa, parameter pembetulan jam satelit dan pembetulan atmosfir. Pada dasarnya, jenis kod staran yang digunakan untuk menerima signal satelit menghadkan tahab ketepatan pengukuran yang boleh didapati dari sistem itu. Signal GPS dipancarkan melalui dua jalur,  $L_1$  (1575.42 MHz.) dan  $L_2$  (12227.60 MHz.), yang dimodulatkan dalam dua tahap kejituhan; kod-P (Precision), dikenali juga dengan kod-PPS (Precise Positioning Service) dan kod-C/A (Course Aquisition), dikenali juga dengan kod-SPS (Standard Positioning Service). Signal pembawa  $L_1$  dimodulatkan dalam kedua dua jenis kod, manakala signal pembawa  $L_2$  hanya mengandungi kod-P. Ketidaaan kod-C/A dalam signal pembawa  $L_2$  adalah disengajakan untuk menghadkan penentududukan yang boleh didapati oleh pengguna awam GPS yang tidak diberikuasa menggunakan sistem tersebut (unauthorized user).

Kod-P dipancarkan pada frekuansi jam dengan kadar chip 10.23 MHz., oleh itu satu frekuansi kod-P bersamaan dengan 29.31 m. Kod-C/A pula dipancarkan pada kadar 1.023 MHz. dan diulang dalam tempoh 1 millisaat. Satu frekuansi kod-C/A bersamaan dengan 293.1 m. Kadar chip yang tinggi bagi kod-P dan penyelesaianya yang boleh dibuat kurang dari 0.5 m membolehkan pengukuran jarak-samu dibuat dengan ketepatan lebih kurang 5 m. Ketepatan yang boleh didapati menggunakan kod-C/A pula adalah dalam lingkungan 8 m. Masakini, pengguna-pengguna awam GPS masih lagi dibenarkan menerima kod-P.

#### 4.2 Ketepatan Orbit Satelit

Bagi penentududukan absolut yang berdasarkan vektor jarak satelit dari titik cerapan, segala selisih kedudukan satelit akan diserap terus dalam vektor jarak tersebut. Justeru itu, selisih akan terdapat pada kedudukan titik yang dihitung. Untuk penentududukan relatif pula, ketepatan kedudukan pengukuran bergantung pada panjang garis dasar yang diukur dan jarak satelit dari titik cerapan. Kesan selisih kedudukan satelit pada pengukuran garis dasar boleh dianggarkan dengan persamaan berikut,

$$\frac{db}{b} = \frac{dr}{p} \quad (1)$$

dimana;

- |    |   |                                        |
|----|---|----------------------------------------|
| b  | : | panjang garis dasar,                   |
| db | : | selisih garis dasar,                   |
| p  | : | jarak satelit dari kedudukan titik dan |
| dr | : | selisih kedudukan satelit.             |

Altitud satelit GPS adalah lebih kurang 20,200 km, dan dari persamaan (1) ketepatan pengukuran boleh dianggarkan sekiranya ketepatan orbit satelit diketahui. Masakini ketepatan GPS satelit yang dipancarkan dalam esemeris staran adalah dalam lingkungan 20 m hingga 60 m, Ayob Sharif (1989). Ini sepadan dengan ketepatan pengukuran relatif 1 bds (bahagian dalam sejuta) hingga 3 bds. Ketepatan ini memadai untuk kebanyakan penggunaan seperti kerja-kerja ukur kadestar dan kejuruteraan. Untuk kerja-kerja saintifik pula, seperti mengesan pergerakan plet bumi, ketepatan orbit yang lebih tinggi diperlukan.

### **4.3 Kaedah Pengukuran**

Dua tahab ketepatan adalah ketara mengikut dua kaedah utama pengukuran GPS, iaitu pengukuran jarak-samu dan pengukuran fasa pembawa. Perbezaan ketepatan ini adalah kerana, pada asasnya, panjang gelombang (wavelength) signal pembawa adalah lebih pendek dari kedua jenis kod, iaitu 19 cm bagi pembawa  $L_1$  dan 24 cm bagi pembawa  $L_2$ , berbanding dengan 30 m bagi kod-P dan 300 m bagi kod-C/A. Justeru itu, interpolasi akan menghasilkan resolusi pengukuran fasa pembawa yang lebih baik dengan ketepatan persamaan pengukuran linear pada tahab kurang daripada sentimeter. Oleh itu pengukuran fasa pembawa adalah lebih tepat dari pengukuran jarak-samu.

Pengukuran fasa pembawa juga tidak mudah dipengaruhi oleh kesan berbilanglaluan (multipath) berbanding dengan pengukuran jarak-samu. Berbilanglaluan ialah kemungkinan sebahagian dari signal satelit sampai ke antena alatpenerima melalui pembalikan dari bumi atau permukaan lain seperti bangunan, tembuk, kapal, dsbnya. Oleh itu bagi semua kerja pengukuran yang memerlukan kejituhan tinggi, penentududukan mestilah dilaksanakan secara relatif sebagaimana yang diterangkan dalam para 3.0.

### **4.4 Bias dan Selisih GPS**

Pada amnya pengukuran GPS dipengaruhi oleh bias yang boleh dibahagikan kepada 3 kategori: bias satelit, bias stesen dan bias yang berkait dengan cerapan. Bias satelit mengandungi bias jam satelit dan bias efemeris staran. Jam satelit mempunyai ofset dari waktu rujukan dalam waktu GPS, ofset frekuansi dan drif frekuansi. Nilai ofset waktu adalah besar manakala, ofset frekuansi dan drif frekuansi adalah kecil kerana satelit-satelit GPS membawa jam atom, iaitu menggunakan osillator caesium atau rubidium. Bias efemeris yang dimaksudkan adalah ketidakstabilan parameter efemeris staran memberi kedudukan sebenar satelit di orbit. Ini ialah kerana efemeris staran hanya ditentuarkan (extrapolated) dari orbit lepas proses (post-processed).

Bias satelit juga tidak tersekait (correlated) antara satelit-satelit, dan kesannya kepada pengukuran fasa pembawa dan jarak-samu adalah sama. Parameter pembetulan jam satelit dan maklumat lain diberi dalam penghantaran data (data message) satelit. Jika pembetulan jam ini digunakan untuk penentududukan, ketepatan yang diperolehi adalah lebih kurang 10 m. Oleh itu untuk penentududukan jitu, pembetulan jam perlu diselesaikan menggunakan cerapan dalam pelarasian bersama kodinet-kodinet titik. Pembetulan jam satelit boleh dihapuskan melalui pembezaan cerapan (differencing of observables).

Bias stesen pula mengandungi bias jam alatpenerima dan ketidakpastian kodinet stesen-stesen yang digunakan sebagai rujukan. Nilai bias jam alatpenerima bergantung pada jenis osillator yang digunakan, biasanya kristal quartz. Ketidakpastian stesen pula bergantung pada kaedah penentuan stesen rujukan tersebut. Jika VLBI (Very Long Baseline Interferometry) atau SLR (Satellite Laser Ranging) digunakan bias ini adalah kecil, kerana kaedah tersebut memberi kejituhan yang tinggi.

Bias yang berhubung dengan cerapan pula mengandungi bias lengah troposiar dan ionosiar dan juga bias yang bergantung pada kaedah pengukuran. Contohnya, bias ambiguiti kitar integer (integer cycle ambiguity) hanya terdapat pada pengukuran fasa pembawa. Kesan troposiar pada pengukuran GPS berubah daripada 2 m apabila satelit berada di zenit hingga 25 m bila satelit berada hampir di horizon, kira-kira  $5^{\circ}$  rendah, Wells et al (1986). Model pembetulan kesan lengah troposiar seperti Model Hopfield dan Model Saastamoimen biasa digunakan untuk mengatasi masalah ini.

Kesan ionosiar terhadap pengukuran GPS pula boleh berubah daripada melebihi 150 m di masa bintikmatahari (sunspot) maksima, la itu pada tengahari dan satelit berada hampir di horizon, kepada 5 m ketika bintikmatahari minima, la itu pada waktu malam dan satelit berada di zenit. Wells et al (1986). Pengukuran dengan alatpenerima dua-frekuansi boleh mengurangkan sebahagian besar kesan ionosiar ini. Pembetulan kesan troposiar dan ionosiar ini lebih berkesan lagi jika cerapan dibezakan dan merancangkan supaya garis dasar yang diukur tidak terlalu panjang.

Selain daripada bias, pengukuran GPS juga dipengaruhi oleh berbagai selsih, seperti berbilanglaluan, kesan bayangan (imaging effect) gelincir kitar (cycle slips) dan selsih rambang cerapan. Perbincangan yang agak panjang diperlukan untuk menerangkan kaedah mengurangkan kesan selsih-seliseh tersebut.

## 5.0 Kesimpulan

Perlaksanaan konstilasi GPS yang lengkap sedang giat diusahakan semula oleh DoD sejak lebih kurang 1 tahun kebelakangan ini. Walaupun sistem GPS belum beroperasi sepenuhnya, masakini penggunaanya sudah boleh membuat penentududukan dengan ketepatan relatif antara 1 hingga 6 bds. Dirantau ini tingkap cerapan satelit GPS adalah antara 4 hingga 5 jam setiap sesi cerapan, dan tempoh ini adalah memadai bagi membuat cerapan dengan ketepatan pengukuran yang baik.

Skim "Selective Availability" yang dirancangkan bagi menghadkan ketepatan penentududukan masa-haktik untuk pengguna awam pasti akan dikuatkuasakan apabila konstilasi GPS lengkap. Apabila perkara ini berlaku, adalah diharapkan ketepatan pengukuran relatif menggunakan fasa pembawa masih boleh memenuhi keperluan kebanyakan pengukuran kadestar dan kejuruteraan. Bagi penentududukan yang memerlukan ketepatan yang lebih tinggi, melebihi 0.1 bds, seperti kegunaan geodetik dan geodinamik maklumat tambahan seperti orbit jitu dan koefisien pembetulan jam satelit yang lebih jitu perlu didapatkan dari agensi-agensi luar negeri yang membuat pejejakan satelit dan penentuan orbit.

## Rujukan

- Anderson, P.H, dan Hauge, S(1989): *GPS Orbit Determination Using Pseudo-range*. Fifth Geodesy Symposium On Satellite Positioning. New Mexico, March.
- Ayob Sharif (1989): *Analysis of Broadcast, Precise and Integrated Orbits for Global Positioning System Satellites*. Ph.D Thesis. University of Newcastle- Upon-Tyne, June
- Wells (ed) et. al. (1986): *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, New Brunswick, Canada.

TABLE 1

**Satellite visibility for LAT: N3-0-0.00 LONG:E102-0-0.00 Alt:300.00(m) k1**  
**Date of Table: 28-NOV-89 (Day 332) Date of Almanac: 01/0-38/9 Cut off Angle:15**  
**Min Visible Sats: 1**

Aim Ref	515	516	515	516	516	516	516	516	515	516	516
SV Num	2	3	6	9	11	12	13	14	15	16	19
UTC Time	EL	AZ	EL	AZ	EL	AZ	EL	AZ	EL	AZ	EL
21:00:00	27	17			30	237			10	214	
21:20:00	29	27			34	248			12	206	
21:40:00	30	37	5	337	36	261			14	198	
22:00:00	32	47	14	338	36	274			17	191	
22:20:00	34	58	22	338	34	286			21	184	
22:40:00	35	70	31	335	32	298			26	177	
23:00:00	35	82	41	330	1	333	29	308	10	260	32
23:20:00	34	94	49	332	9	331	25	319	11	270	38
23:40:00	31	105	57	308	16	327	22	328	10	280	44
00:00:00	27	115	61	287	24	321	20	337	10	290	50
00:20:00	22	124	61	263	30	312	18	346	9	299	56
00:40:00	17	131	57	242	35	302	17	355	8	308	60
01:00:00	10	136	50	226	38	289	16	3	5	317	61
01:20:00	3	140	43	215	39	275	17	12	10	312	58
01:40:00			35	206	38	262	18	21	13	304	53
02:00:00			28	198	35	249	20	30	16	295	46
02:20:00			22	191	31	238	23	40	17	285	38
02:40:00			16	184	27	228	26	50	19	359	30
03:00:00				11	177	22	219	28	61	15	265
03:20:00			3	136	7	170	18	210	31	73	14
03:40:00			9	1342	4	162	15	202	32	85	12
04:00:00			15	348	3	154	12	193	32	98	245
04:20:00			22	353	2	146	10	185	30	110	8
04:40:00			31	358	2	137	10	177	26	121	6
05:00:00			40	3	3	129	10	169	21	131	210
05:20:00			50	8	4	120	11	161	15	139	201
05:40:00			60	14	6	111	13	152	8	145	193
06:00:00			71	24	7	102	15	143	1	149	185
06:20:00			81	55	9	92	18	134			48
06:40:00			80	135	10	82	22	125			135
07:00:00			70	162	10	73	25	114			169
07:20:00			59	169	9	63	28	103			160
07:40:00			48	172	6	54	30	91			143
08:00:00			38	172	3	46	30	79			103
08:20:00			28	171			29	67			132
08:40:00			19	169			25	56			119
09:00:00			11	166			20	46			85
09:20:00			4	163			14	39			67
09:40:00							7	33			52
10:00:00											52
10:40:00											52
11:00:00											41
11:20:00											36
11:40:00											36
12:00:00											36
12:00:00											36
12:20:00											36
13:00:00											36
13:20:00											36
13:40:00											36
14:00:00											36
14:20:00											36
14:40:00											36
15:00:00											36