

PENGESANAN TEC IONOSFERA DENGAN TEKNOLOGI GPS

MD. NOR KAMARUDDIN & WAN ABDUL AZIZ WAN MOHD AKIB

Fakulti Kejuruteraan & Sains Geoinformasi

Universiti Teknologi Malaysia

Skudai

80990 Johor Bahru

Abstrak. Perkembangan yang pesat dalam teknologi angkasa lepas seperti Global Positioning System (GPS) memberi kemudahan di dalam bidang geoinformatik di mana ianya berkemampuan untuk memberikan hasil pengukuran posisi yang jitu di samping dapat membantu pengesanan TEC ionosfera. Gelombang isyarat yang dipancarkan daripada satelit GPS adalah sumber yang sangat berguna untuk pengukuran TEC ionosfera. Nilai mutlak TEC boleh didapati dari pengukuran beberapa kelewatan kumpulan gelombang isyarat jalur-L manakala nilai relatif dan mutlak TEC dari hasil pengukuran fasa pembawa isyarat GPS ini, pengesanan TEC ionosfera yang berkekituan tinggi boleh didapati. Tulisan ini membentangkan pelbagai model TEC ionosfera dan aspek pengesanan TEC ionosfera dengan pengukuran GPS.

1 PENDAHULUAN

Sistem Penentududukan Sejagat atau "Global Positioning System" (GPS) juga dikenali sebagai "NAVigation System with Timing And Ranging" (NAVSTAR) adalah satu sistem yang direka untuk tujuan navigasi sejagat yang menggunakan satelit sebagai peranti angkasa lepas. Sistem ini pada awalnya adalah khusus untuk pihak tentera Amerika Syarikat tetapi kini penggunaannya telah dibuka kepada semua golongan pengguna di seluruh dunia sama ada di daratan, lautan mahupun di angkasa. Maklumat navigasi termasuk kedudukan, kelajuan dan masa dapat disampaikan secara serentak oleh sistem GPS kepada pengguna. Keistimewaan GPS memberikan penentududukan geodetik sejagat, serantau dan setempat dalam masa hakiki dapat membantu pengumpulan data untuk bidang-bidang lain.

Perambatan gelombang radio melalui ionosfera akan mengakibatkan kelewatan masa rambatan disebabkan oleh ketumpatan elektron (Total Electron Content atau TEC). TEC ionosfera ini melibatkan faktor-faktor tertentu, di antaranya ialah kedudukan geografi, waktu tempatan, musim, perubahan yang keterlaluan pada cas-cas ion matahari, perubahan bintik matahari (~11 tahun satu kitaran) dan aktiviti magnetik. Lapisan ionosfera akan memantulkan balik gelombang radio yang berfrekuensi rendah dari 30mhz tetapi isyarat GPS yang berfrekuensi tinggi akan menembusi lapisan ini. Namun begitu lapisan ini tetap akan mempengaruhi halaju laluan isyarat satelit GPS dan keadaan ini memberikan peluang untuk kajian terhadap lapisan ionosfera. Dengan menggunakan teknologi GPS, pengesanan TEC ionosfera secara berterusan dapat dilakukan dan maklumat model TEC ionosfera boleh disediakan untuk semua pengguna teknologi setelit.

2 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

Pada masa kini gugusan satelit GPS mengandungi 24 satelit yang bergerak 12 jam didalam orbit masing-masing, pada altitud 20,200 kilometer atas permukaan bumi (lihat Rajah 1). Sistem ini boleh dibahagikan kepada tiga segmen utama iaitu Segmen Angkasa Lepas, Segmen Kawalan Bumi dan Segmen Pengguna.

2.1 Segmen Angkasa Lepas

Segmen angkasa ini terdiri daripada satelit GPS yang merupakan satu peranti yang dilengkapi dengan pelbagai alatan seperti 'radio transceivers', komputer, jam atomik, alatan elektronik, antena-antena serta dua sayap (wings) yang bersaiz 7.25m^2 bagi menjanakan kuasa suria demi menyokong aktiviti pergerakan satelit. Satelit GPS berfungsi menerima dan menyimpan isyarat yang mengandungi maklumat efemeris satelit dari stesen pusat kawalan bumi dan memancarkan isyarat dan maklumat tersebut kepada pengguna.

2.2 Segmen Kawalan Bumi

Segmen pengawalan ini terdiri daripada stesen-stesen pusat kawalan yang membuat pengawalan bagi menjejak satelit GPS, pembetulan jam atomik serta orbit satelit GPS, ramalan pembetulan data metrologi, penyelarasan waktu satelit-satelit GPS serta memancarkan maklumat-maklumat navigasi dan hasil hitungan efemeris satelit-satelit GPS. Terdapat lima stesen kawalan bumi yang membuat penjejakan dan kawalan terhadap sistem ini. Taburan kedudukan stesen tersebut adalah merata diseluruh dunia: Hawaii, Colorado Spring, di Lautan India kepulauan Lautan Utara Pasifik dan Lautan Atlantik.

2.3 Segmen Pengguna

Segmen ini terdiri daripada pengguna, alat penerima GPS, perkakasan dan perisian-perisian. Terdapat dua jenis kategori pengguna sistem Gps yang utama iaitu pengguna militari, khas untuk Jabatan Pertahanan Amerika Syarikat dan sekutunya sahaja, manakala pengguna awam adalah pengguna sistem GPS yang menjalankan aktiviti penentududukan, penjejakan kenderaan, pandu arah kenderaan kecemasan dan polis, pengawalan deformasi struktur seperti empangan, bangunan tinggi dan sebagainya. Jenis alat penerima GPS adalah terdiri dari alat penerima kod perolehan kasar dan/atau fasa pembawa.

2.4 Struktur Isyarat GPS

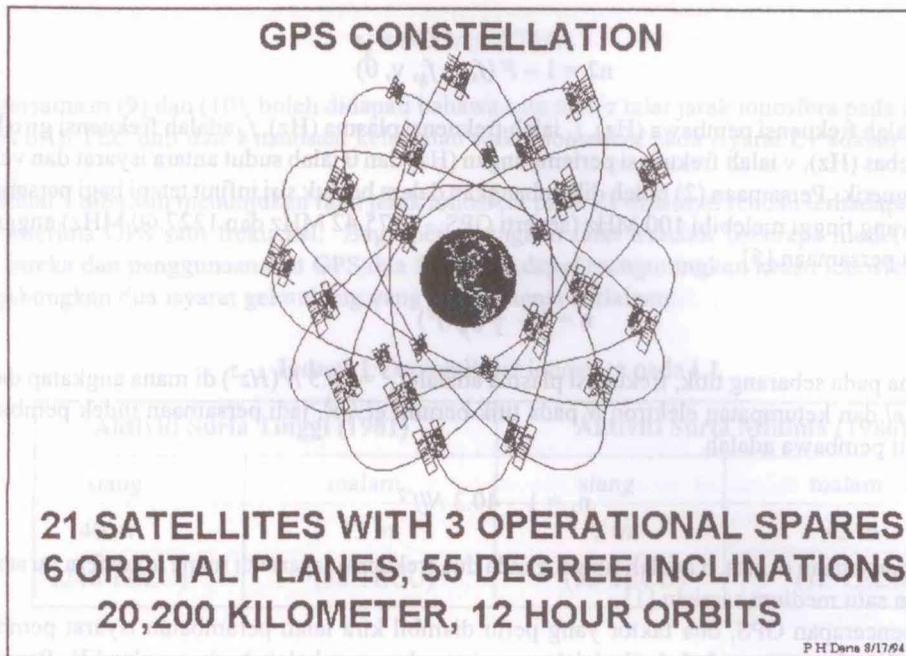
Isyarat GPS dibentuk daripada frekuensi asas jam atomik 'ribidium' atau 'cesium' yang mempunyai frekuensi asas 10.23MHz (f_0). Setiap satelit GPS memancarkan dua jenis isyarat gelombang jalur-L; L1 yang berfrekuensi 1575.42MHz ($f_0 \times 154$) dan L2 yang frekuensinya 1227.60MHz ($f_0 \times 120$). L1 berjarak gelombang 19 sentimeter manakala L2 pula berjarak gelombang 25 sentimeter. Fasa-fasa pembawa ini dimodulasikan oleh dua jenis kod, kod perolehan kasar (Course Acquisition - C/A code) dan kod kejituan (precise - P code). Fasa pembawa L1 dimodulasikan dengan kod C/A bersama kod P, manakala fasa pembawa L2 dimodulasikan dengan kod P sahaja. Kod C/A mempunyai frekuensi 1.023MHz ($f_0/10$) dan mempunyai jarak gelombang 300 meter manakala frekuensi kod P adalah 10.23MHz (f_0) dan mempunyai jarak gelombang 30 meter.

Alat penerima GPS dapat menerima satu atau kedua-dua kod tersebut untuk mendapatkan dua jenis cerapan iaitu pencerapan julat semu (pseudo-range measurement) dan cerapan fasa pembawa (carrier-phase measurement). Cerapan jenis yang pertama sesuai digunakan untuk penentududukan masa hakiki yang berjituan kurang tinggi manakala cerapan jenis kedua pula sesuai untuk penentududukan berkejitan tinggi serta memerlukan pemrosesan-lepas (post processing).

3.0 IONOSFERA DAN GPS

3.1 'Total Electron Content' (TEC) Ionosfera

Ionosfera merupakan satu lapisan atmosfera yang berada pada altitud antara 50 kilometer hingga lebih dari 1000 kilometer dari permukaan bumi. Kewujudan lapisan ini adalah disebabkan oleh



Rajah 1 Gugusan Satelit Global Positioning System (GPS)

kekuatan pancaran ultra ungu matahari sehingga molekul gas di dalam atmosfera menjadi 'ionize' dan membebaskan elektron yang akan mempengaruhi penyebaran signal elektromagnetik.

Lapisan ionosfera akan memantulkan balik gelombang radio yang berfrekuensi lebih rendah daripada 30 MHz. Apabila rambatan gelombang radio seperti GPS yang berfrekuensi radio ultra tinggi melalui lapisan ionosfera, halaju isyaratnya akan dipengaruhi oleh elektron yang bebas ini. Kelewatan masa disebabkan oleh pengaruh ini boleh ditentukan dengan ketumpatan elektron yang disifatkan sebagai jumlah elektron di dalam satu kolum keratan tegak pada keluasan 1 meter persegi. Jumlah elektron ini dikenali sebagai '**Total Electron Content**' (TEC). Secara matematik, TEC dapat diberikan sebagai kamilan (integral) ketumpatan elektron di sepanjang laluan isyarat radio iaitu;

$$TEC = \int N ds \quad (1)$$

di mana N ialah ketumpatan elektron dan ds ialah elemen garis yang tersangat kecil. Ketumpatan elektron ini adalah fungsi jumlah radiasi matahari terjadi. Sepanjang hari, TEC pada sesuatu tempat adalah bergantung kepada waktu tempatan yang mencecah maksima antara jam 12:00 dan 16:00. Unit bagi pengukuran TEC adalah 10^{16} elektron per m^2 .

3.2 Perambatan lewat isyarat GPS melalui lapisan inosfera

Pengaruh ionosfera terhadap isyarat radio dinyatakan di dalam bentuk indek pembiasan. Bagi sesuatu medium, n , indek pembiasan dapat di definisikan sebagai nisbah halaju perambatan radiasi di dalam angkasa bebas kepada halaju perambatan radiasi yang sama di dalam medium tersebut. Di dalam ruang hampagas, $n = 1$ manakala bagi medium yang lain ianya bernilai tinggi atau rendah.

Bagi ionsfera, nilai n di dapati dari rumus Apperlerton-Hartree [1] dan dapat ditulis sebagai fungsi F

$$n^2 = 1 - F(f, f_p, f_h, v, \theta) \quad (2)$$

di mana f ialah frekuensi pembawa (Hz), f_p ialah frekuensi plasma (Hz), f_h adalah frekuensi giro bagi elektron bebas (Hz), v ialah frekuensi pertembungan (Hz) dan θ ialah sudut antara isyarat dan vektor medan magnetik. Persamaan (2) boleh dikembangkan dalam bentuk siri infinit tetapi bagi persebaran frekuensi yang tinggi melebihi 100 MHz (seperti GPS:- 1575.42 MHz dan 1227.60 MHz) anggaran dibuat dari persamaan [5]

$$n = 1 - \frac{1}{2} (f_p^2 / f^2) \quad (3)$$

Oleh kerana pada sebarang titik, frekuensi plasma adalah $f_p^2 = 80.5 N$ (Hz^2) di mana angkatap dalam unit $\text{m}^3/\text{s}^2 \text{ el}$ dan ketumpatan elektron N pada titik berunit el/m^3 , jadi persamaan indek pembiasan bagi isyarat pembawa adalah

$$n_\phi = 1 - 40.3 N / f^2 \quad (4)$$

Di dalam persamaan di atas, n adalah fungsi ganda dua frekuensi isyarat di mana ionsfera itu sendiri merupakan satu medium serakan [1].

Bagi pencerapan GPS, dua faktor yang perlu diambil kira ialah perambatan isyarat pembawa bersama halaju fasa v_ϕ manakala kod adalah perambatan bersama halaju berkumpulan [7]. Pengaruh ionsfera dalam dua keadaan iaitu keawalan fasa (phase advance) dan kelewatan kumpulan ('group delay'). Keawalan fasa mempengaruhi pengukuran fasa pembawa manakala kelewatan kumpulan mempengaruhi pengukuran kod julat semu. Magnitud kedua-dua kesan ini adalah sama tetapi berlainan tanda (+/-).

Kaitan antara indek fasa pembiasan n_ϕ dengan indek kumpulan pembiasan n_g dapat ditulis sebagai [6]:

$$n_g = n_\phi + f (dn_\phi / df) \quad (5)$$

Oleh kerana $(dn_\phi / df) = 40.3 N (2/f^3)$, kita akan dapati nilai indek pembiasan kumpulan sebagai:

$$n_g = 1 - (40.3N/f^2) + f \cdot 2 (40.3 N/f^3) = 1 + (40.3 N/f^2) \quad (6)$$

Jarak antara alat penerima GPS dan satelit didapati dari perbedaan sepanjang isyarat tersebut, kita dapati ralat jarak keawalan fasa

$$\Delta_\phi^{\text{ion}} = (-40.3/f^2) \text{ TEC} \quad (7)$$

dan keawalan fasa dalam unit saat

$$\tau_\phi = (-40.3/cf^2) \text{ TEC} \quad (8)$$

di mana halaju cahaya $c = 2.997 \times 10^8 \text{ m/s}$

Kelewatan kumpulan pula diberikan sebagai

$$\Delta_g^{\text{ion}} = (40.3/f^2) \text{ TEC} \quad (9)$$

dan kelewatan kumpulan dalam unit nanosaat ialah

$$\tau_g = (40.3/cf^2) \text{ TEC} \tag{10}$$

dari persamaan (9) dan (10), boleh didapati bahawa satu meter ralat jarak ionosfera pada isyarat L1 adalah 6.16 TEC unit dan 1 nanosaat kelewatan waktu ionosfera pada isyarat L1 adalah 1.85 TEC unit.

Jadual 1 dibawah menunjukkan ralat jarak ionosfera pada L1 di latitud rendah terhadap pengguna alat penerima GPS satu frekuensi. Bagi mengurangkan ralat tersebut beberapa model ionosfera telah direka dan penggunaan alat GPS dua frekuensi dapat mengurangkan kesan ionosfera dengan mengabungkan dua isyarat gelombang yang berfrekuensi berlainan.

Jadual 1 Contoh Ralat ionosfera pada L1

| Aktiviti Suria Tinggi (1981) | | Aktiviti Suria Minima (1986) | |
|------------------------------|-----------|------------------------------|-----------|
| siang | malam | siang | malam |
| 40 m | 13 m | 9 m | <2 m |
| (246 TECU) | (80 TECU) | (55 TECU) | (12 TECU) |

4 MODEL IONOSFERA

Terdapat 2 jenis model ionosfera iaitu Model Teoritikal dan Model Empirikal.

Model teoritikal atau model fizikal adalah berdasarkan pada hukum fizik atau anggaran dibuat pada struktur dan pelbagai perubahan/peralihan ionosfera itu sendiri. Model empirikal pula berdasarkan pada cerapan ionosfera.

Ada tiga jenis model empirikal:

- Model Bent
- Ionosfera Fujukan Antarabangsa (IRI)
- Model Klobuchar

Model pertama dan kedua diklasifikasikan sebagai model global. Model Bent digunakan untuk menghitung profil ketumpatan elektron dari ketinggian 0 ke 1000 kilometer. Input dalam model ini adalah haribulan, waktu (Universal Time; UT), lokasi pencerap, 'solar flux' dan jumlah bintang matahari. Manakala model IRI pula menyediakan profil tegak elektron yang secara membulat dan ketumpatan ion serta suhu. Input model IRI pula adalah lokasi pencerap, jumlah bintang matahari, haribulan dan waktu (UT). Keadaan ionosfera tempatan mungkin berbeza dari model global diatas.

Satu model telah direkabentuk oleh Klobuchar dari model Bent yang dipermudahkan supaya dapat digunakan oleh pengguna yang mempunyai alat penerima GPS satu frekuensi. Ia menggunakan bahagian positive gelombang kosin dengan angkatap yang dikenali sebutan DC bagi memodelkan keadaan harian terhadap kelewatan waktu di lokasi pencerap.

$$T_g = DC + A \text{ Kos } (2\pi(t - T_p)/P) \text{ saat} \tag{11}$$

di mana DC ialah angkatap offset, A (amplitud), T_p (fasa) dan P (PERiod) adalah parameter model. Nilai DC dan T_p diambil pada 5ns dan 50400s (14j) waktu tempatan, amplitud da period diberikan sebagai order ketiga polinomial.

$$A = \sum \alpha_i \phi_i, \quad P = \sum \beta_i \phi_i \quad (12)$$

di mana ϕ_i ialah latitud geomagnetik bagi titik 'sub ionosfera', α_i dan β_i ($i=0,1,2,3$) adalah angkali yang dianggarkan oleh Pusat Stesen Kawalan GPS ('GPS Master Control Starion') dari siaran maklumat navigasi.

Pada masakini, model Klobuchar adalah satu model yang kerap kali digunakan kerana model ini dapat mengurangkan antara 50% - 60% kesan sistemetik ionosfera keatas isyarat alat penerima GPS satu frekuensi [3].

5 MENGUKUR DAN MEMODEL TEC IONOSFERA DENGAN GPS

Penentuan bagi pembetulan kelewatan ionosfera pada isyarat GPS adalah setanding dengan nilai TEC ionosfera. TEC adalah satu indek ionosfera yang penting. Ianya adalah pengukur keadaan ionosfera dan dapat memberi magnitud pembiasan ionosfera utama, polarisasi dan kelewatan waktu isyarat radio trans-ionosfera.

Pada prinsipnya, jika alat penerima GPS dwi-frekuensi digunakan, TEC ionosfera boleh didapati terus dari perbezaan antara pencerapan jarak semu L1 dan L2 [11]. Menggunakan pengukuran jarak semu, ralat jarak kelewatan kumpulan ialah

$$\begin{aligned} R_2 - R_1 &= \Delta_{g2}^{\text{ion}} - \Delta_{g1}^{\text{ion}} + (\epsilon R_2 - \epsilon R_1) \\ &= \text{TEC} (\alpha_2 - \alpha_1) + \epsilon R_{21} \end{aligned} \quad (13)$$

R_i , $i = 1, 2$ adalah pengukuran jarak semu dari L1 dan L2. ϵR_{21} adalah ralat rambang dan $\alpha_i = (40.3/f^2_i)$, $i = 1,2$ adalah angkatap (m^3 per elektron).

Dengan mengabaikan ralat rambang, TEC ionosfera dapat ditulis sebagai

$$\text{TEC} = (R_2 - R_1)/(\alpha_2 - \alpha_1) = 9.5196 \times 10^{16} (R_2 - R_1) \quad (14)$$

Dari persamaan (14), didapati 1ns (atau 30cm) perbezaan kelewatan kumpulan ditunjukkan sebagai 2.85 TEC.

Walaupun pengukuran GPS adalah jitu bagi majoriti pengguna tetapi TEC ionosfera tidak dapat ditentukan hanya dengan pengukuran jarak semu. Ini adalah kerana kesan dari pengaruh 'multipath' dan pengaruh dari L1/L2. Bagi mengurangkan keadaan ini, gabungan pengukuran dari fasa dengan pengukuran jarak semu perlu dilakukan.

Alat penerima GPS yang mencerap kod P dan fasa digunakan dalam pengukuran pengesanan TEC ionosfera. Data TEC dari GPS pula dapat digabungkan dengan pengukuran 'ionosonde' di bumi untuk memberikan ketebalan lapisan yang boleh dijadikan indek bagi mengukur perubahan suhu dan kandungan di dalam thermosfera dan plasmasfera [4] dan [12].

Bagi memodel ionosfera, pada kebiasaannya satu model lapisan kulit ionosfera dimana elektron bebas dianggap menumpu di lapisan sfera yang sangat nipis pada ketinggian h diatas permukaan bumi digunakan [9]. Lapisan ini dianggap berada diantara ketinggian 300km ke 400 km yang setanding pada ketinggian kemuncak kawasan-F ketumpatan elektron [10]). Persilangan garis

pandangan daripada alat penerima ke satelit melalui lapisan kulit ionosfera ini pada titik tebok, jika diunjurkan secara pugak pada permukaan bumi satu titik yang dikenali sebagai titik sub-ionosfera dapat ditentukan (Rajah 2). Dengan cara ini satu model TEC ionosfera boleh dibentuk sebagai fungsi pemetaan yang menggambarkan TEC pugak pada titik sub-ionosfera. Oleh kerana TEC ionosfera dicerap melalui garis pandangan antara alat penerima dan satelit, kedudukan titik sub-ionosfera dapat dimodelkan dengan

$$TEC_m = S(E) \times F(\beta: x, y) + b \tag{15}$$

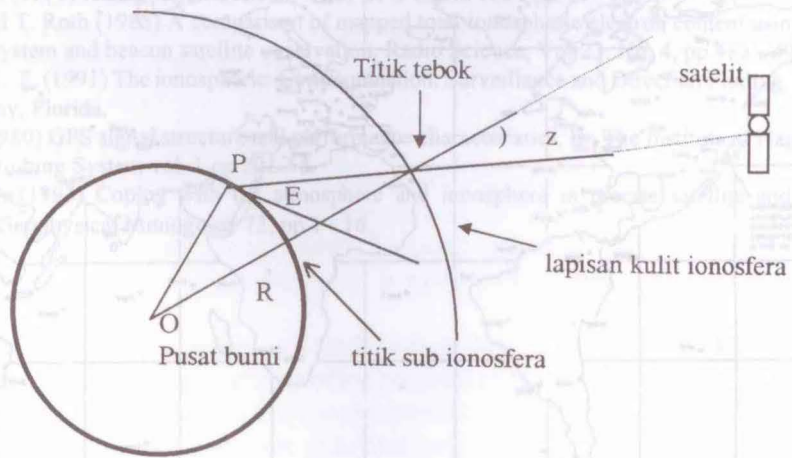
di mana TEC_m ialah pencerapan TEC, β ialah vektor parameter model dan $S(E)$ dikenali sebagai faktor keserongan ditulis

$$S(E) = 1/\cos(z) \tag{16}$$

dengan nilai z (dalam radian) sebagai

$$z = \sin^{-1} (R \cos E / (R + h)) \tag{17}$$

di mana R ialah purata jejari bumi, h ialah ketinggian lapisan kulit ionosfera (400 km) dan E ialah sudut pugak satelit. Dalam persamaan (15), $F(\beta: x, y)$ ialah fungsi pemetaan pugak TEC dengan model parameter berformatkan polinomial atau kembangan harmonik sferikal di mana β dan b adalah pengaruh di dalam satelit dan alat penerima GPS. Model parameter ini boleh dianggarkan dengan cara kaedah ganda dua terdikit.



nota: P = lokasi pengguna
E = sudut pugak

h= ketinggian anggaran lapisan ionosfera
R= purata jejari bumi

Rajah 2 Titik Sub-inosfera

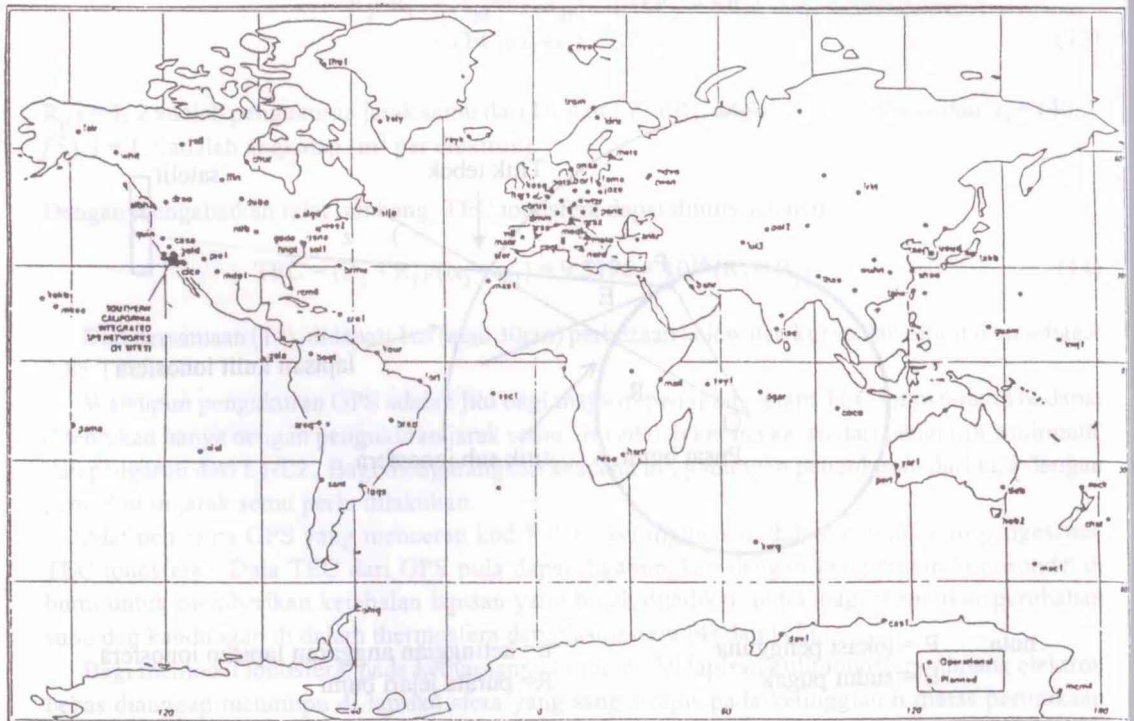
6 APLIKASI TEKNIK GPS

Ahli geodesi akan cuba menghapuskan semua kesan sistematik dan stokastik ionosfera bagi mendapatkan kejutuan yang tinggi di dalam penentududukan posisi. Manakala ahli geofisik pula mempunyai kepentingan tertentu untuk penganalisan fenomena ionosfera seperti mendapatkan nilai TEC, penyelidikan perubahan cuaca sejagat (global change research) dan juga ramalan meteorologi. Terdapat beberapa teknik yang boleh digunakan bagi menganggarkan TEC ionosfera seperti 'Faraday Rotation Technique' [2] yang menggunakan satelit geostationari. Namun demikian, data yang didapati dari teknik ini adalah terhad pada liputan spatial (ruang).

Semasa kerja penghapusan pengaruh ionosfera dalam jaringan geodetik dibuat, kajian untuk menggunakan GPS dalam mengesan TEC dan perubahan ionosfera dapat dilakukan. Teknik menggunakan GPS boleh menerima lebih dari empat isyarat GPS serentak dari berbagai arah dan dapat menggambarkan pemetaan ionosfera secara yang lebih terperinci. Stesen kawalan dan penjejakan kekal GPS (Permanent GPS Tracking Stations) boleh dilengkapi dengan perisian-perisian tertentu bagi menghitung komponen TEC ionosfera, (lihat Rajah 3). Data pencerapan selama 24 jam sehari dapat memberikan perubahan TEC ionosfera dan juga data dari stesen penjejakan kekal GPS diseluruh dunia membolehkan kajian ini dilaksanakan di mana saja. Hasil TEC ionosfera yang didapati daripada cerapan GPS ini dapat dibandingkan dengan hasil pencerapan yang dijalankan dengan teknik lain seperti 'ground-based Ionosonde Measurements'.

7 KESIMPULAN

Perkembangan pesat teknologi GPS telah dapat memberi kemajuan di dalam penentududukan yang tepat dan penggunaan sistem ini telah banyak diiktiraf secara meluas dalam pelbagai bidang. Operasi



Rajah 3 Jaringan Penjejakan GPS (International GPS Service for Geodynamics).

pencerapan GPS diseluruh dunia dipengaruhi oleh ketumpatan elektron ionosfera (TEC) sepanjang laluan signal dari satelit ke alat penerima GPS. Variasi pada TEC ionosfera memberi kesan secara langsung kepada pengguna alat penerima GPS satu frekuensi jika dibandingkan dengan penggunaan alat penerima GPS dwi frekuensi yang dapat memberi pembetulan kesan ionosferik setiap masa tetapi maklumat tentang waktu dan kawasan kekuatan amplitud yang menurun masih diperlukan. Pada masa kini model ionosfera mempunyai kejituan yang rendah dan pemetaan ionosfera masa hakiki adalah penting. Berdasarkan pada cerapan GPS TEC ionosfera dapat diperolehi dengan penukaran komponen TEC sepanjang laluan isyarat gelombang GPS ke satu model TEC yang dapat dinyatakan sebagai fungsi gambaran TEC tegak di titik sub-ionosfera. Dengan pencerapan GPS sepanjang masa di suatu stesen dan maklumat yang diperolehi dari stesen penjejakan kekal GPS seluruh dunia maka pengesanan TEC ionosfera boleh dilaksanakan dan pemetaan ionosfera tempatan dapat dilakukan.

RUJUKAN

- [1] Budden, K. G. (1985) *The Propagation of Radio Waves*, Cambridges University Press.
- [2] Davies, G. (1990) *Ionosfera Radio*, Peter Peregrinus Ltd.
- [3] Fees, W. and S. Stephen (1987) Evaluation of GPS ionospheric time delay model, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 13 pp 1 - 8.
- [4] Goodwin, G.; J. Silby, K. Lynn, A. Breed and E. Essex (1995) Ionospheric slab thickness measurement using GPS satellites in Southern Australia, *Adv. Space Res*, Vol. 15, No. 2 pp 125 - 135.
- [5] Hartmann, G. K. and R. Leitinger (1984) Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for single frequencies above 100 MHz. *Bulletine Geodesique*, vol. 58, pp 100 - 136.]
- [6] Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins (1992) *Global Positioning System: Theory and Practice*, Spring-Verlag, Berlin.
- [7] Klobuchar, J. (1991) Ionospheric time delay algorithm for single frequency GPS users, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 23 No. 3 pp 325 - 332.
- [8] Klobuchar, J. (1991) Ionospheric effects on GPS, *GPS World* 1991 pp 48 - 51.
- [9] Lanyi, G. and T. Roth (1988) A comparison of mapped total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observation. *Radio Science*, Vol 23, No. 4, pp 483 - 492.
- [10] McNamara, L. F. (1991) *The ionospheric: Communication. Surveillance and Direction Finding*, Kereger Pub. Company, Florida.
- [11] Spilker, J. (1980) GPS signal structure and performance characteristics, In: *The Institute of Navigation: GLobal Positioning System* vol. 1 pp 29 - 54.
- [12] Yunck, T. P. (1993) Coping with the atmosphere and ionosphere in precise satellite and ground positioning, *Geophysical Monograph* 73, pp 1 - 16.