

Kesan Perubahan TEC, Profil Ionosfera dan Arah Kedudukan Stesen Penerima Terhadap Ralat Ionosfera Isyarat GPS

(The Effect of the Changes in the TEC, Inosphere Profile and the Position of Receiver Station towards Inosphere Error Experienced by GPS System)

Mardina Abdullah, Siti Sarah Nik Zulkifli & Mahamod Ismail

ABSTRAK

Sistem Penentududukan Global (GPS) merupakan satu sistem radio navigasi berasaskan satelit yang digunakan bagi menentukan kedudukan suatu lokasi. Semenjak ketersediaan terpilih (selective availability, SA) ditamatkan pada 1 Mei 2000, ralat ionosfera menjadi punca ralat terbesar dalam sistem penentududukan GPS. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis ralat ionosfera disebabkan oleh perubahan nilai TEC dan profil ionosfera yang dialami oleh isyarat GPS. Selain itu, analisis turut dijalankan untuk melihat kesan perubahan arah kedudukan stesen bergerak dalam aplikasi GPS bezaan (dGPS) jarak dekat (≤ 10 km) ke atas ralat ionosfera yang dialami oleh sistem GPS. Data yang digunakan adalah berdasarkan stesen GPS UKM ($2^{\circ} 55' N$, $101^{\circ} 46' E$) dan juga UPM Serdang, UPMS ($2^{\circ} 59' N$, $101^{\circ} 43' E$). Daripada analisis kesan perubahan nilai TEC, didapati peningkatan nilai TEC menyebabkan ralat ionosfera bertambah kerana dalam analisis TEC pada profil 100 TECU mempunyai ralat ionosfera 46.7 m berbanding profil 11 TECU iaitu 5.13 m. Analisis perubahan profil ionosfera pula tidak menunjukkan perkaitan yang signifikan. Manakala analisis kesan perubahan arah stesen bergerak pula menunjukkan ketaksekatan ionosfera memberi ralat ionosfera berlainan bagi orientasi perambatan isyarat di antara satelit dan penerimanya. Perbezaan ralat ionosfera bagi pemisahan stesen bergerak pada arah Utara 0° didapati sama nilai dengan arah Selatan 180° , manakala beza ralat pada arah Timur 90° pula sama dengan Barat 270° , Barat Laut 315° didapati sama dengan Tenggara 135° , manakala pada arah Timur Laut 45° pula sama dengan Barat Daya 225° . Kesemua faktor-faktor ini perlu dipertimbangkan sekiranya ingin mendapatkan penentududukan jitu GPS yang tepat.

Kata kunci: ionosfera; NeQuick; surihan sinar; dGPS; TEC

ABSTRACT

Global Positioning System (GPS) is a satellite-based navigation radio system which is used to determine the location of a site. Since the termination of selective availability (SA) on 1 May 2000, ionospheric error has become the largest source of error in GPS positioning. The aim of this research is to analyse ionospheric error that is caused by the changes in TEC value and the ionosphere profile experienced by GPS signals. Apart from that, analysis was also carried out to find out the effect of the changes in the direction of mobile station positions in short distance differential GPS application (dGPS) (≤ 10 km) on the ionospheric error experienced by the GPS system. The data was based on GPS stations in UKM ($2^{\circ} 55' N$, $101^{\circ} 46' E$) and in UPM Serdang, UPMS ($2^{\circ} 59' N$, $101^{\circ} 43' E$). From the analysis on the effect of TEC changes, it was found that the increase in the TEC value led to the increment of the ionospheric error because in the TEC analysis, a profile with 100 TECU yielded ionospheric error of 46.7 m while a profile with 11 TECU yielded only 5.13 m. The analysis of the ionospheric profile changes did not give any significant result. Meanwhile, the analysis on the effect of the position changes of the rover stations showed that the irregularities of the ionospheric behaviours gave different range of ionospheric errors for the signal propagation orientation between the satellite and its receiver. The difference in ionospheric error for the separation of the rover station at North 0° direction was equal to the difference in ionospheric error at South 180° , while the ionospheric error at East 90° was found equal to the West 270° , and North-West 315° equal to the South-East 135° , while North-East 45° was equal to the South-West 225° . All these factors should be considered in order to obtain an accurate GPS precise positioning.

Keywords: ionosphere; NeQuick; ray-tracing; dGPS; TEC

PENGENALAN

Lapisan ionosfera terletak pada atmosfera bumi pada ketinggian 100 km sehingga 2000 km dari permukaan bumi (Schaer et al. 1996). Lapisan ini mengandung kandungan elektron bebas kerana ia terdedah kepada sinaran ultralembayung daripada matahari (Abdullah et al. 2011). Gelombang radio atau isyarat daripada GPS (*Global Positioning System*) merentasi lapisan ionosfera akan terganggu oleh kewujudan elektron-elektron bebas tersebut. Masa perambatan yang dilalui oleh isyarat radio dalam ruang vakum tidak sama dengan jarak sebenar dari satelit GPS kepada penerima, perbezaan nilai tersebut merupakan ralat ionosfera dalam ukuran GPS (Xinlong & Yafeng 2009).

Keadaan ionosfera juga sentiasa berubah-ubah kerana sifat ketidakhomogenan yang dimilikinya. Isyarat GPS akan mengalami perubahan pada halaju dan juga arah (Shukla et al. 2009) di sepanjang laluan merentasi medium ionosfera. Ini menyebabkan berlakunya lengah atau lajukan pada isyarat berbanding jika ia melalui vakum. Jarak lengah atau lajukan isyarat ini berkadar langsung dengan jumlah kandungan elektron (*Total Electron Content* – TEC) yang terdapat di sepanjang laluan daripada satelit kepada penerima. TEC merupakan parameter yang menerangkan keadaan aktiviti ionosfera dan ditakrifkan sebagai jumlah elektron yang terkandung di dalam satu lajur keratan rentas seluas 1 m^2 atau 1 meter persegi pada laluan isyarat iaitu di antara satelit sehingga penerima. Ia dinyatakan dalam unit TEC (TECU), di mana 1 TECU adalah bersamaan dengan $10^{16} \text{ el.m}^{-2}$. Xinlong & Yafeng (2009) menyatakan bahawa ralat bacaan kedudukan oleh GPS juga boleh berubah mengikut masa, tempat, musim dan kitar suria.

Di atmosfera bumi juga terdapat aktiviti geomagnet yang boleh mengganggu isyarat GPS. Kekuatan aktiviti geomagnet diukur dalam bentuk indeks magnet. Indeks K_p (*p: planetary*) adalah ukuran piawai bagi menyatakan kekuatan medan magnet bumi yang dibaca dalam setiap tempoh 3 jam iaitu dalam bentuk integer 0 – 9. Hari yang tenang adalah hari yang mempunyai nilai indeks geomagnet K_p di antara 1 sehingga 4. Sekiranya indeks K_p adalah di antara nilai 5 sehingga 9, hari tersebut dikatakan mengalami gangguan geomagnet (Rashid et al. 2005).

Kaedah GPS bezaan (*Differential GPS*, DGPS) merupakan salah satu kaedah bagi mengurangkan ralat ionosfera terhadap kejituan bacaan penentuan kedudukan sistem GPS. Dalam DGPS, kesan ionosfera boleh ditentukan di stesen pangkalan atau disebut stesen rujukan dan digunakan untuk membetulkan pengukuran julat di stesen bergerak. Teknik ini dapat diaplikasikan menggunakan satu atau lebih stesen rujukan di lokasi-lokasi yang diketahui. Pada masa kini, GBAS (*Ground Base Augmentation System*) merupakan salah satu aplikasi DGPS yang digunapakai di Australia bagi tujuan navigasi seperti mendaratkan kapal terbang. NDGPS (*Nationwide Differential Global Positioning System*) pula digunakan oleh Amerika Syarikat bagi sistem navigasi mereka. Ralat julat yang dikira pada stesen rujukan dihantar

kepada stesen bergerak dan pembetulan dilakukan pada stesen bergerak tersebut. Kaedah ini berjaya sekiranya stesen rujukan dan bergerak mempunyai sumber ralat yang umum dan juga ralat perambatan melalui ionosfera adalah sama pada kedua-dua stesen penerima GPS (kedua-dua stesen menerima isyarat yang melalui ionosfera yang sama).

Kajian ini dilakukan untuk menganalisis kesan perubahan beberapa faktor yang boleh mempengaruhi nilai ralat ionosfera yang dialami oleh stesen penerima isyarat GPS. Kajian dilakukan dengan menggunakan kaedah surihan sinar. Kebanyakan model ionosfera yang ada pada masa sekarang tidak mengambil kira sebutan peringkat tinggi dalam persamaan indeks biasan, namun bagi kaedah surihan sinar, persamaan indeks biasan yang digunakan adalah persamaan indeks biasan peringkat tinggi dalam formula indeks biasan. Ia mengambil kira kesan medan geomagnet pada isyarat satelit GPS (Zulkifli et al. 2007). Faktor yang dikaji adalah perubahan nilai TEC, profil ionosfera serta arah stesen bergerak berdasarkan sebuah stesen rujukan tetap dalam aplikasi dGPS. “d” kecil digunakan kerana ingin membezakannya dengan sistem DGPS yang digunakan sekarang. Ralat jarak ditentukan pada stesen rujukan (tetap) yang diketahui lokasinya dan digunakan untuk membetulkan ralat pada stesen lain (bergerak). Jarak pemisahan stesen-stesen tersebut haruslah dalam jarak dekat seperti 10 km supaya ralat ionosfera pada kedua-dua stesen adalah sama dan berhubung kait. Menurut Hernández-Pajares et al. (2003), kaedah DGPS mempunyai ketepatan daripada unit meter sehingga sentimeter bergantung kepada garis tapak dan juga jenis pembetulan yang dihantar.

SURIHAN SINAR

Kaedah surihan sinar telah digunakan oleh pengkaji-pengkaji dalam kajian magnetosfera bagi gelombang radio berfrekuensi tinggi (HF) dan juga dalam rambatan transionosfera iaitu merentasi lapisan ionosfera. Jones dan Stephenson (1975) telah mendokumenkan program komputer FORTRAN yang serba guna untuk menjejak sinar yang melalui medium anisotropik yang mana setiap indeks biasannya dipelbagaikan secara berterusan tanpa henti dalam bentuk tiga dimensi sehingga ke titik hujung sinar.

KAEDAH HOMING-IN

Surihan sinar sahaja tidak mampu mengira secara terus kesemua laluan sinar yang tiba pada penerima. Ia hanya dapat mengira laluan sinar apabila diberi lokasi penerima, frekuensi dan sudut spesifik dongak dan azimut untuk mendapatkan arah penghantaran, jika tidak isyarat akan kehilangan sasaran yang spesifik. Satu bentuk prosedur diperlukan untuk mencari arah sebenar yang patut dilalui oleh isyarat kepada penerimanya dengan tepat setelah

dibiaskan oleh ionosfera. Proses menghalakan isyarat ini disebut sebagai penumpuan (*homing-in*). Untuk ini, algoritma Nelder-Mead digunakan dalam surihan sinar yang mengubahsuai nilai awal sudut dongak dan azimut bagi meminimumkan ralat di antara koordinat akhir isyarat tersebut sampai kepada koordinat sebenar penerima isyarat. Secara matematik, penentuan laluan perambatan melibatkan peminimuman dua parameter (seperti sudut dongak dan azimut). Menurut Strangeways (2000), fungsi peminimuman diberikan seperti dalam persamaan (1):

$$F(x) = F(\theta, \varphi) = |\theta_c - \theta_r| + |\varphi_c - \varphi_r| = 0 \quad (1)$$

di mana θ_c dan φ_c masing-masing adalah latitud dan longitud akhir pada penerima isyarat berdasarkan laluan yang dikira oleh surihan sinar dengan algoritma Nelder-Mead. Manakala θ_r dan φ_r pula adalah latitud dan longitud sebenar penerima pada altitud satelit yang digunakan. Ini akan memberi nilai minimum kosong pada fungsi apabila titik akhir laluan isyarat yang dikira oleh surihan sinar sepadan dengan lokasi penerima isyarat tersebut.

PROFIL KETUMPATAN ELEKTRON EKSPONEN

Komponen utama yang diperlukan apabila menjalankan kaedah surihan sinar adalah profil ketumpatan elektron (N_e) kerana ia menyediakan parameter bagi pengiraan laluan isyarat GPS (Ioannides & Strangeways 2000). Ciri-ciri profil N_e yang dikehendaki oleh surihan sinar ialah mempunyai fungsi selanjat pertama, kedua dan ketiga (Stankov et al. 2007). Profil N_e yang mempunyai kriteria tersebut boleh diperolehi dengan memadankan (*fitting*) profil ionosfera sebenar yang diperolehi daripada NeQuick dengan fungsi eksponen seperti dalam persamaan (2). NeQuick diperkenalkan oleh *International Telecommunication Union-Radiocommunication* (ITU-R) (Leitinger & Radicella 2002) dan turut digunakan di *European Space Agency* (ESA). NeQuick memberikan profil ketumpatan elektron menegak dan condong. Model ini yang telah diuji di sekitar kawasan latitud tengah dan kawasan kutub di Hemisfera Utara dari altitud 500 km hingga 1000 km telah memberikan nilai TEC yang lebih tepat berbanding data eksperimen yang diperolehi melalui satelit Intercosmos-19 (Coisson et al. 2002). Persamaan (2) yang dinyatakan

adalah seperti berikut:

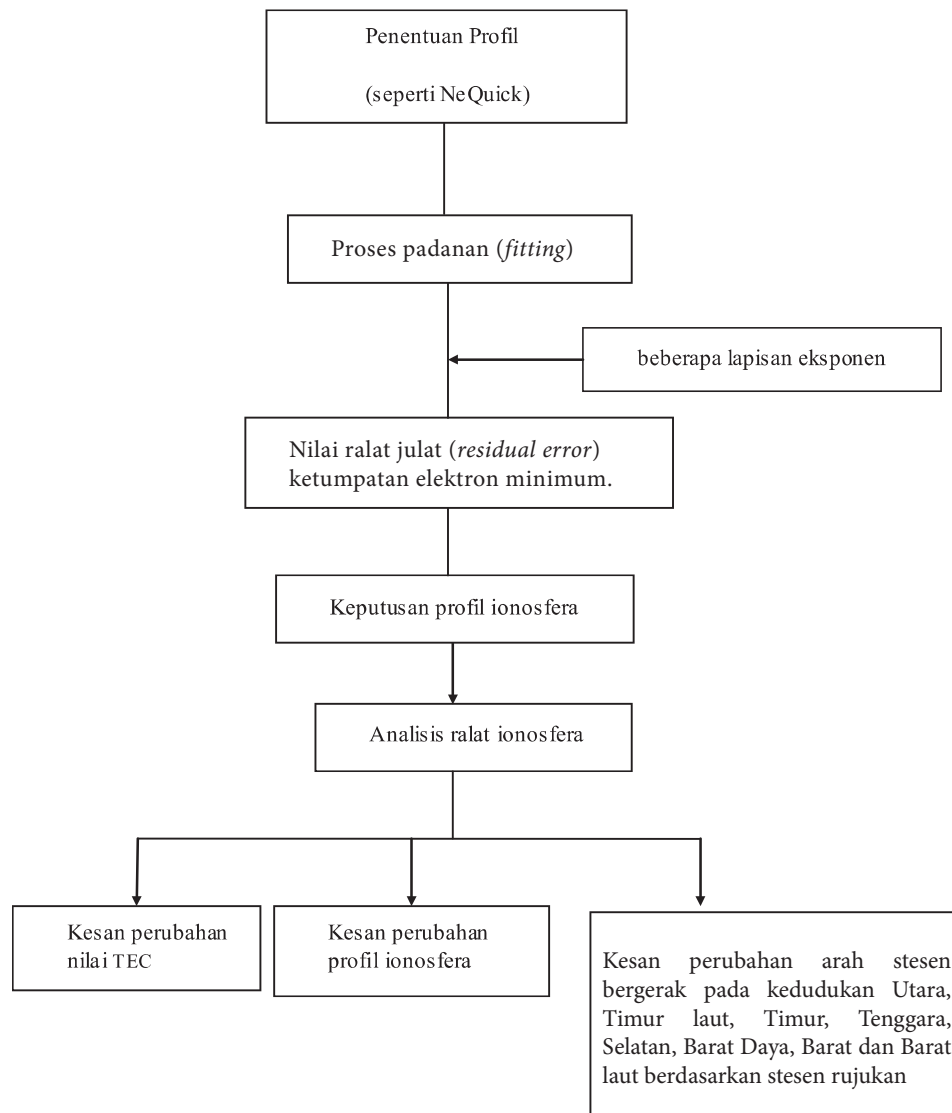
$$N_e = N_m \exp \left[- \left(\frac{h - h_m}{\sigma} \right)^a \right] \quad (2)$$

di mana N_m adalah ketumpatan elektron maksimum pada lapisan eksponen, h pula adalah ketinggian di atas bumi berdasarkan profil ketumpatan ionosfera yang digunakan, h_m adalah ketinggian pada N_m dan σ merupakan ketebalan lapisan pertengahan.

Daripada proses padanan profil ionosfera daripada NeQuick dengan persamaan (2), profil N_e yang dihasilkan bergantung sepenuhnya kepada eksponen a . Bentuk lapisan parabolik (pada $a=2$) adalah dalam lingkungan ketinggian 100 hingga 600 km. Bentuk lapisan parabolik utama boleh didapati dengan penjumlahan kesemua lapisan eksponen biasanya mempunyai 15 sehingga 40 lapisan bergantung kepada nilai TEC dan TEC residual yang diperlukan. Menurut Ioannides & Strangeways (2000), nilai TEC yang lebih tinggi dan nilai TEC residual yang lebih rendah akan melibatkan banyak lapisan eksponen. Persamaan (2) merupakan fungsi eksponen yang dipadankan (*fitting*) ke atas profil ketumpatan elektron ionosfera NeQuick bagi menghasilkan sebuah model ketumpatan elektron yang mempunyai fungsi selanjat pertama, kedua dan ketiga yang akan digunakan dalam kajian ini.

KAEDAH KAJIAN

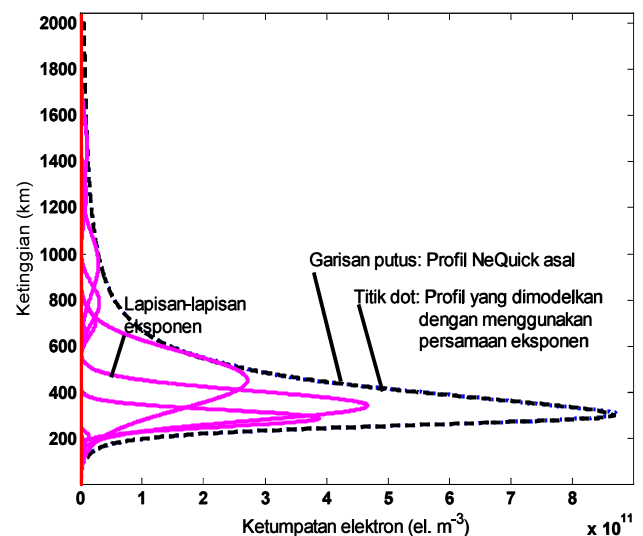
Surihan sinar 3D Jones digunakan bagi mengkaji ralat ionosfera pada isyarat GPS. Keberkesanan kaedah ini telah dibuktikan dalam beberapa terbitan jurnal oleh Abdullah et al. (2010), Abdullah et al. (2009), Norsuzila et al. (2009), Ioannides & Strangeways (2000) dan Zulkifli et al. (2009). Susunan diagram kaedah kajian ini ditunjukkan dalam Rajah 1. Data diambil berdasarkan stesen GPS UKM (2° 55' N, 101° 46' E) dan UPMS (2° 59' N, 101° 43' E) pada 7 Jun 2007 iaitu pada hari yang tenang tanpa gangguan geomagnet yang mempunyai nilai indeks Kp di bawah nilai 4. Profil ionosfera daripada NeQuick dipadankan dengan beberapa lapisan eksponen menggunakan persamaan (2) sehingga mendapat nilai ralat julat ketumpatan elektron minimum. Profil N_e yang diperolehi kemudiannya digunakan dalam analisis ralat ionosfera bagi melihat kesan perubahan TEC, profil ionosfera serta kedudukan stesen penerima terhadap isyarat GPS.



RAJAH 1. Susunan di kaedah kajian

Rajah 2 menunjukkan model NeQuick yang dipadankan dengan 24 lapisan eksponen dengan nilai ralat julat ketumpatan elektron yang diperolehi adalah 1.1×10^{-2} TECU iaitu $1.1 \times 10^{14} \text{ el. m}^{-2}$. Ralat julat ketumpatan elektron yang tidak melebihi $10^{16} \text{ el. m}^{-2}$ dikategorikan sebagai baik kerana apabila ralat julat ketumpatan elektron adalah $10^{16} \text{ el. m}^{-2}$, bermakna ralat dalam TEC adalah sebanyak satu unit ($10^{16} \text{ el. m}^{-2} = 1 \text{ TECU}$). Satu unit TEC akan memberi ralat sejauh lebih kurang 0.16 m.

Bagi mengkaji kesan perubahan TEC ke atas isyarat GPS, sebuah profil ionosfera digunakan. TEC asal dalam profil ionosfera tersebut didarabkan dengan beberapa faktor tertentu bagi mendapatkan profil ionosfera yang sama dengan nilai TEC berbeza. Pendaraban faktor ini adalah berdasarkan nilai TEC asal profil ini iaitu 22 TECU. Kajian ini melihat ralat ionosfera pada satu profil ionosfera dengan empat TEC berbeza iaitu 11 TECU, 22 TECU, 50 TECU dan 100 TECU. Ini dilakukan untuk melihat kesan perubahan TEC ke atas isyarat GPS disebabkan oleh ketidakstabilan jumlah



RAJAH 2. Proses padanan profil ionosfera dengan lapisan eksponen

kandungan elektron dalam lapisan ionosfera.

Dalam kajian kesan perubahan profil ionosfera, tiga profil ionosfera berbeza digunakan yang diambil pada hari berlainan serta mempunyai nilai TEC tidak sama. Bagi melihat kesan perubahan profil ionosfera ini, ketiga-tiga profil disamakan nilai TEC dengan mendarabkannya kepada beberapa faktor pendaraban menjadikan setiap profil 50 TECU. Profil A adalah profil ionosfera yang diambil pada 8 Januari 2007, profil B pula diambil pada 5 Jun 2007 dan profil C adalah pada 7 Jun 2007. Pemilihan hari adalah berdasarkan indeks Kp rendah iaitu kurang daripada 4 supaya dapat mengurangkan risiko ralat yang disebabkan faktor lain seperti gangguan ionosfera bergerak (*travelling ionospheric disturbance*, TID). Ini kerana jika nilai indeks Kp tinggi, bermakna aktiviti matahari aktif dan kemungkinan terdapat gangguan geomagnet dan ini menyumbang pada peningkatan proses pengionan lapisan ionosfera yang menyebabkan analisis tidak tepat.

Hanya 3 data digunakan dalam kajian ini kerana proses mendapatkan profil N_e daripada proses padanan bersama fungsi eksponen adalah rumit serta memerlukan masa yang lama sehingga dua hari bagi setiap data. Malah ada ketikanya ralat julat ketumpatan elektron yang diperolehi daripada proses tersebut tidak memenuhi piawai yang dikehendaki justeru perlu memulakan proses dari awal.

Jadual 1 menunjukkan maklumat profil ionosfera yang digunakan. Ralat ionosfera pula diperolehi dengan menggunakan kaedah program surihan sinar. Nilai ralat min punca kuasa dua (*root mean square error*, RMSE) telah dikira berdasarkan 30 nilai ralat ionosfera pada beberapa sudut dongak yang dikaji pada profil-profil tersebut. Persamaan (3) adalah persamaan bagi RMSE di mana Σ adalah jumlah nilai, $\bar{X}$ adalah purata nilai sebenar dan μ adalah purata nilai min punca kuasa dua.

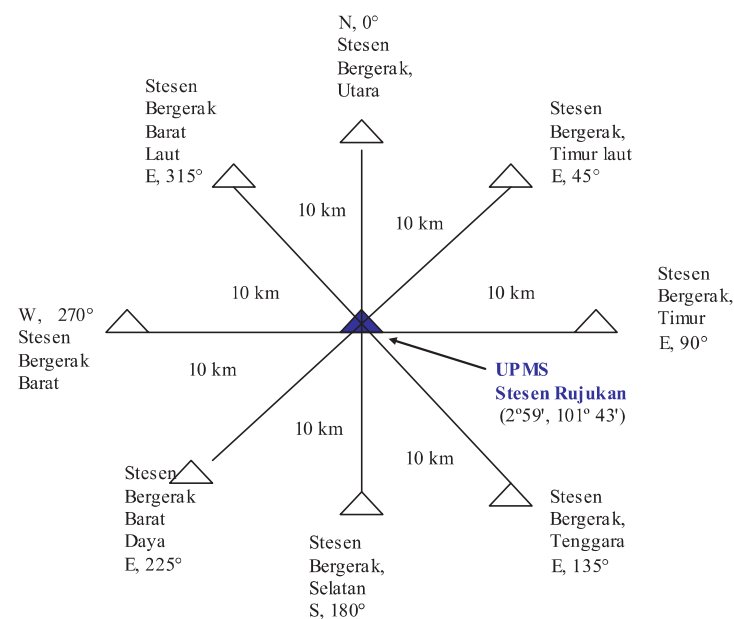
$$RMSE(\bar{X}) = \sqrt{\Sigma(\bar{X} - \mu)^2} \quad (3)$$

JADUAL 1. Data yang diskalakan kepada 50 TECU

Tarikh data	Jenis profil	Nilai TEC asal
8 Januari 2007	Profil A	24 TECU
5 Jun 2007	Profil B	31 TECU
7 Jun 2007	Profil C	22 TECU

Kajian tentang kesan perubahan arah stesen bergerak terhadap ralat ionosfera pada stesen penerima GPS dilakukan bagi aplikasi dGPS bagi jarak dekat (≤ 10 km). Perbandingan di antara ralat ionosfera pada stesen bergerak dan stesen rujukan (stesen tetap) dilakukan. Untuk ini, stesen GPS Universiti Putra Malaysia Serdang (UPMS) ($2^\circ 59' \text{ N}$, $101^\circ 43' \text{ E}$) digunakan sebagai stesen rujukan. Ralat ionosfera dikaji dengan meletakkan beberapa stesen bergerak pada

arah Utara, Timur Laut, Timur, Tenggara, Selatan, Barat Daya, Barat dan Barat Laut stesen rujukan tersebut. Kajian ini dilakukan untuk melihat perbezaan ralat ionosfera yang dialami oleh stesen penerima apabila melalui arah perambatan yang berlainan di lapisan ionosfera. Rajah 3 menunjukkan hubungan geometri di antara stesen rujukan dan bergerak yang dikaji.



RAJAH 3. Hubungan geometri di antara stesen rujukan dan bergerak yang dikaji

Ralat ionosfera iaitu bagi kumpulan pada isyarat kod, td_g pada stesen penerima GPS diperolehi daripada perbezaan di antara perbezaan jarak laluan sinar daripada penerima dan satelit P_r^s (ditentukan melalui program surihan sinar) dan jarak perambatan isyarat dalam garis nampak (*line of sight*, LOS) secara garisan lurus pada halaju cahaya dalam vakum. persamaan diberikan seperti dalam persamaan (4).

$$td_g = P_r^s - LOS \quad (4)$$

di mana P_r^s adalah laluan isyarat daripada satelit s kepada penerima r dan LOS adalah garis nampak.

Ralat ionosfera pada stesen GPS diperolehi daripada persamaan (4) manakala perbezaan ralat ionosfera di antara stesen rujukan dan bergerak diperolehi daripada persamaan (5). Dalam persamaan (5), $td_{Rujukan}$ adalah merujuk kepada ralat ionosfera pada stesen rujukan manakala $td_{Bergerak}$ adalah ralat ionosfera pada stesen bergerak.

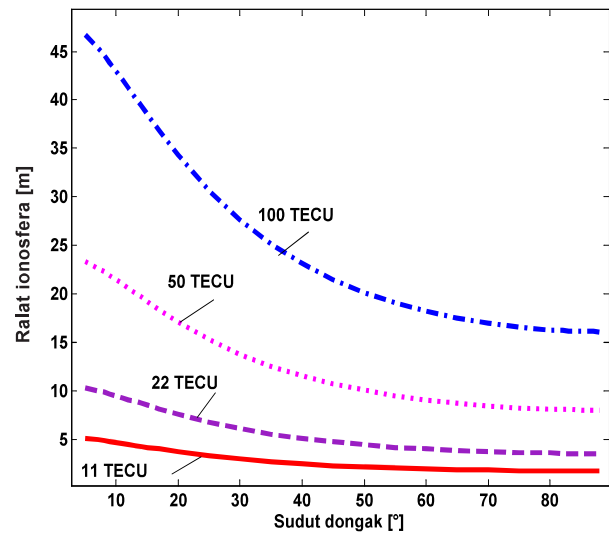
$$\Delta td = td_{Rujukan} - td_{Bergerak} \quad (5)$$

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 4 menunjukkan kesan perubahan TEC ke atas ralat ionosfera, diplot dalam beberapa sudut dongak dengan julat daripada 5° sehingga 90° . Secara umum, ralat ionosfera bertambah besar dengan pengurangan nilai sudut dongak. Dan ralat ionosfera berkurang secara beransur-ansur dan menghampiri nilai sifar pada sudut dongak 90° . Ini kerana apabila isyarat GPS yang melalui ionosfera secara tegak iaitu dengan sudut dongak 90° , perambatan isyarat dalam ionosfera adalah lebih pendek, justeru kurang mengalami ralat ionosfera berbanding jika melalui jarak lebih jauh dan ralat ionosfera lebih besar pada laluan secara serong dengan sudut dongak yang kecil.

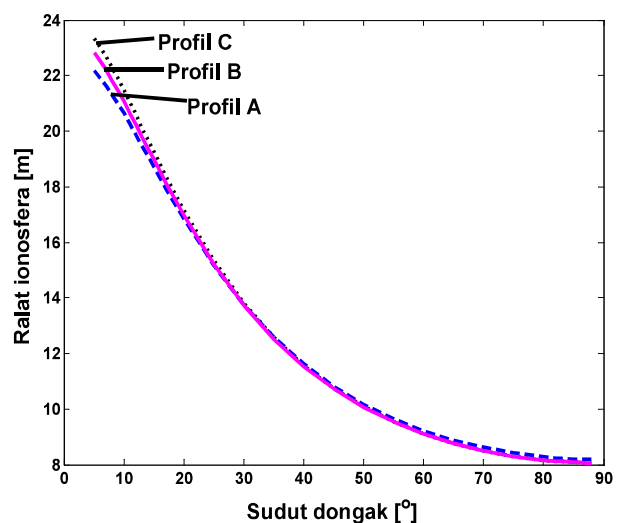
Namun daripada empat nilai TECU yang dikaji, nilai ralat ionosfera Δtd yang paling besar dilihat melalui profil 100 TECU dengan nilai maksimumnya adalah 47 m pada sudut dongak 5° sementara yang nilai Δtd maksimum yang paling rendah diperolehi daripada profil yang mempunyai 11 TECU dengan ralat ionosfera adalah 5 m. Ini berikutan daripada teori bahawa TEC adalah berkadar secara langsung dengan ralat ionosfera yang dialami oleh isyarat GPS. Secara turutan perbandingan bagi sudut dongak 5° , nilai ralat ionosfera maksimum yang didapati daripada profil tersebut adalah tertinggi pada 100 TECU iaitu 47 m, diikuti 50 TECU ialah 23 m, 22 TECU ialah 10 m dan 11 TECU pula adalah 5 m. Manakala ralat ionosfera pada sudut dongak yang besar iaitu 80° , ralat ionosfera yang diperolehi ialah 16 m, 8 m, 4 m, 2 m masing-masing bagi profil ionosfera dengan 100 TECU, 50 TECU, 22 TECU dan 11 TECU.

Ini menunjukkan bahawa perubahan nilai TEC dalam profil ionosfera memberi kesan berbeza terhadap ralat ionosfera yang dialami oleh GPS. Menurut Garner (2008), ralat ionosfera adalah berkadar terus dengan TEC di sepanjang garis nampak antara satelit GPS dan



RAJAH 4. Kesan perubahan TEC ke atas ralat ionosfera

penerima di Bumi. Melalui nilai TEC juga, ralat ionosfera boleh dibetulkan kerana hubungan langsungnya dengan TEC. Oleh sebab itu, dalam pendekatan tradisional untuk membetulkan ralat ionosfera dilakukan dengan memodelkan TEC di sepanjang setiap laluan isyarat satelit. Ini berikutan ralat ionosfera sentiasa menjadi faktor utama ralat yang dialami oleh penerima GPS isyarat frekuensi disebabkan oleh sisihan (*deviation*) besar TEC pada waktu berbeza dalam sehari, musim, dan kitaran suria daripada mana-mana ukuran purata. Perambatan isyarat GPS pada sudut dongak yang kecil seperti 5° akan melalui jarak laluan yang lebih panjang berbanding perambatan isyarat dengan sudut dongak yang besar seperti 90° . Apabila jarak laluan yang ditempuhi isyarat GPS itu jauh dan panjang, bermakna ia melalui ketebalan elektron yang tinggi berbanding pada jarak perambatan lebih pendek. Oleh sebab itu, ralat ionosfera didapati lebih besar pada perambatan isyarat GPS pada sudut dongak kecil seperti 5° berbanding sudut dongak yang besar seperti 90° .



RAJAH 5. Kesan perubahan profil ionosfera terhadap ralat ionosfera

Rajah 5 menunjukkan kesan perubahan profil ionosfera (mempunyai nilai TEC sama) terhadap ralat ionosfera. Secara umumnya ralat ionosfera pada stesen GPS bertambah besar apabila sudut dongak semakin mengecil. Ralat ionosfera didapati berkurang secara beransur-ansur dan menghampiri nilai sifar apabila menghampiri sudut dongak 90° . Pada sudut dongak yang paling kecil iaitu 5° , nilai ralat ionosfera bagi profil A adalah 22 m, profil B pula adalah 23 m dan profil C pula menghampiri 24 m. Manakala

pada sudut 80° , ralat ionosfera adalah berhampiran iaitu pada profil A adalah 8.3 m, profil B pula 8.2 m dan profil C adalah 8.2 m.

Setiap profil yang dikaji ini mempunyai nilai ralat ionosfera yang besar sehingga mencapai beberapa unit m. Nilai RMSE yang diperolehi bagi profil yang dikaji ditunjukkan dalam Jadual 2. Berdasarkan nilai RMSE ini, didapati ralat ionosfera daripada profil A adalah paling kecil iaitu 0.99, diikuti profil B, 1.03 dan C ialah 1.06.

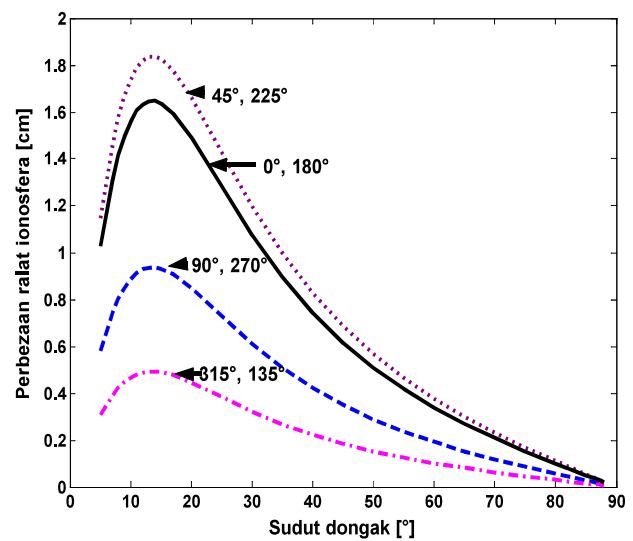
JADUAL 2. Nilai RMSE bagi profil

Profil	A	B	C
RMSE	0.99	1.03	1.06

Daripada analisis kesan perubahan profil ionosfera dengan TEC sama, dapat disimpulkan bahawa perubahan profil ionosfera tidak dapat dikaitkan di antara satu profil dengan profil yang lain kerana setiap profil ionosfera tersebut mempunyai nilai RMSE hampir sama iaitu dalam julat 1 meter. Nilai RMSE yang hampir sama menunjukkan kesan perubahan profil ionosfera tidak begitu ketara berbanding perubahan nilai TEC.

Rajah 6 menunjukkan perbezaan ralat ionosfera, Δtd pada pelbagai sudut dongak. Nilai Δtd bagi semua arah pemisahan didapati meningkat secara positif dengan pengurangan sudut dongak. Pada sudut 5° sehingga 15° , Δtd bagi semua orientasi pada arah rambatan isyarat bertambah tetapi bermula daripada sudut 14° sehingga 90° , ia berkurang secara beransur-ansur dan menghampiri sifar pada sudut dongak 90° . Ini kerana panjang laluan perambatan isyarat GPS di lapisan ionosfera bagi stesen-stesen kajian tersebut hampir pada jarak yang sama.

Nilai mutlak Δtd didapati mempunyai nilai paling tinggi bagi arah Timur Laut dan Barat Daya di mana mempunyai nilai menghampiri 1.4 cm pada sudut dongak 13° dan 0.1 cm pada sudut dongak 80° bagi kedua-dua arah. Sementara nilai mutlak Δtd bagi pemisahan stesen pada arah Utara dan Selatan juga didapati sama iaitu 1.2 cm dan 0.1 cm masing-masing pada sudut dongak 13° dan 80° . Manakala nilai mutlak Δtd pada pemisahan arah Timur dan Barat didapati adalah 0.7 cm dan sifar masing-masing pada sudut dongak 13° dan 80° . Bagi nilai mutlak Δtd yang pada pemisahan stesen di kedudukan Barat Laut



RAJAH 6. $|\Delta td|$ bagi semua arah pemisahan stesen

dan Tenggara juga mempunyai nilai perbezaan ralat yang sama iaitu 0.4 cm pada sudut 13° dan sifar pada sudut dongak 80° . Penurunan nilai Δtd didapati bermula pada sudut 14° sehingga menghampiri sudut dongak 90° adalah disebabkan oleh penurunan nilai ralat ionosfera pada kumpulan isyarat kod pada setiap stesen penerima. Hasil kajian ini disimpulkan pada Jadual 3 yang menunjukkan nilai sebenar Δtd pada arah pemisahan stesen yang dikaji.

JADUAL 3. Perbezaan ralat ionosfera pada arah pemisahan stesen yang dikaji

Arah pemisahan stesen	Beza ralat ionosfera pada sudut dongak 13° (cm)	Beza ralat ionosfera pada sudut dongak 80° (cm)	Arah pemisahan stesen	Beza ralat ionosfera pada sudut dongak 13° (cm)	Beza ralat ionosfera pada sudut dongak 80° (cm)
Timur Laut, 45°	1.4	0.1	Barat Daya 225°	1.4	0.1
Utara 0° , 360°	1.2	0.1	Selatan 180°	1.2	0.1
Timur 90°	0.7	0.0	Barat 270°	0.7	0.0
Barat Laut 315°	0.4	0.0	Tenggara 135°	0.4	0.0

Perbezaan ralat ionosfera di antara laluan stesen rujukan dan stesen-stesen bergerak telah dianalisis. Perbezaan kecil di antara orientasi-orientasi pemisahan stesen adalah disebabkan oleh ralat ionosfera pada garis nampak (*line of sight*, LOS) pada stesen-stesen yang dikaji. Ini kerana isyarat satelit yang diterima oleh stesen-stesen tersebut merentasi keadaan ionosfera yang tidak sama. Jumlah kandungan elektron dalam medium ionosfera di tempat-tempat berlainan secara umumnya tidak sama, justeru memberi ralat jarak pada orientasi yang berlainan berdasarkan laluan di antara satelit dan penerima serta jarak pemisahan stesen rujukan dan bergerak. Walaubagaimanapun, keputusan menunjukkan bahawa bagi jarak pemisahan stesen dalam aplikasi dGPS jarak dekat, iaitu sejauh 10 km, keadaan ionosfera tidak mempunyai perbezaan yang terlalu besar pada semua arah dalam jarak ini. Namun sekiranya kejutuan sehingga unit sentimeter diperlukan, ralat ionosfera ini perlu dipertimbangkan.

KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan, berdasarkan analisis-analisis ralat ionosfera daripada kajian kesan perubahan nilai TEC, profil ionosfera dan perubahan arah stesen bergerak, kesan perubahan nilai TEC adalah faktor yang paling kritikal yang perlu dipertimbangkan. Ini kerana, perubahan nilai TEC jelas menyumbang kepada nilai ralat ionosfera sehingga mencapai unit meter dengan pertambahan nilai TEC dalam profil ionosfera. Manakala perubahan profil ionosfera tidak memberi perbezaan ketara pada ralat ionosfera yang diperolehi meskipun mempunyai nilai TEC sama. Dalam analisis kesan perubahan arah kedudukan stesen bergerak, beza ralat ionosfera, yang diperolehi bergantung pada arah stesen bergerak berdasarkan stesen rujukan. Kesan perubahan TEC adalah faktor paling kritikal yang perlu dipertimbangkan berbanding perubahan faktor yang lain. Ini penting apabila pengguna GPS memerlukan bacaan penentuan kedudukan yang jitu.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada pihak Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI) melalui skim *National Science Fellowship* (NSF) dan juga UKM di atas pembiayaan penyelidikan (SF04-01-02-SF0191 dan UKM-KK-01-FRGS0042-2006) yang diberikan.

RUJUKAN

- Abdullah, M., Mandeep, J. S., Zainuddin, S., Abdullah, S. & Zain, A. F. M. 2011. Variations of foF2 Prior to Earthquakes. *Journal of Metrology Society of India* 26 (2): 97-103.
- Abdullah, M., Strangeways, H. J. & Zulkifli, S. S. N. 2010. Ionospheric differential error determination using ray tracing for a short baseline. *Advances in Space*

- Research* 46 (10):1326-1333.
- Coison, P., Radicella, S. M. & Nava, B. 2002. Comparison of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models. *Journal Annals of Geophysics* 45: 111-116.
- Garner, T. W., Gaussiran II, T. L., Tolman, B. W., Harris, R. B., Calfas, R. S., Gallagher, H. 2008. Total electron content measurements in ionospheric physics. *Advance in Space Research* 42 (4): 720-726.
- Hernández-Pajares, M., Zornoza, J. M. J., Subirana, J. S. & Colombo, O. L. 2003. Feasibility of wide-area subdecimeter navigation with Galileo and modernized GPS. *Proc. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(9): 2128-2131.
- Ioannides, R. T. & Strangeways, H. J. 2000. Ionosphere-induced errors in GPS range finding using MQP modelling, ray-tracing and Nelder-Mead optimization. *Proc. Millennium Conference on Antennas and Propagation*, AP2000, 404-412.
- Jones, R. M. & Stephenson, J. J. 1975. A versatile three-dimensional ray-tracing computer program for radio waves in the ionosphere. *Office of Telecommunications OT Report 75-76: 1-197.*
- Leitinger, R. & Radicella, S. M. 2002. NeQuick ionospheric model. International Telecommunication Union (ITU) official website. <http://www.itu.int/publ/R-SOFT-SG3/en>, (9th Jun 2010).
- Rashid, Z. A. A., Momany, M. A., Sulaiman, S., Ali, M. A. M., Yatim, B., Fraser, G. & Sato, N. 2005. GPS Ionospheric TEC measurement during the 23rd November 2003 total solar eclipse at Scott Base Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 68 (11): 1219-1236.
- Schaer, S., Beutler, G., Rothacher, M. & Springer, T. A. 1996. Daily Global Ionosphere Maps Based on GPS Carrier Phase Data Routinely Produced by the CODE Analysis Center, *Proc. of the IGS AC Workshop*, Silver Spring, MD, USA, 181-192.
- Shukla, A. K., Shinghal, P., Sivaraman, M. R. & Bandyopadhyay, K. 2009. Comparative analysis of the effect of ionospheric delay on user position accuracy using single and dual frequency GPS receivers over Indian region. *Indian Journal of Radio & Space Physics* 38 (1):57-61.
- Stankov, S. M., Marinov, P. & Kutiev, I. 2007. Comparison of Nequick, PIM, and TSM model results for the topside ionosphere plasma scale and transition heights. *Advance in Space Research* 39: 767-773.
- Strangeways, H. J. 2000. Effect of horizontal gradients on ionospherically reflected or transionospheric paths using a precise homing-in method. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (15): 1361-1376.
- Xinlong, W. & Yafeng, L. 2009. Study on adaptability of GPS ionospheric error correction models. *Journal of Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 81(4): 316 -322.
- Zulkifli, S. S. N., Abdullah, M. & Ismail, M. 2007.

Application of 3D ray-tracing for accurate GPS range finding. Proc. 5th IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD), Bangi, Malaysia, 1-5.

Mardina Abdullah*,
Siti Sarah Nik Zulkifli & Mahamod Ismail
Jabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik dan Sistem,
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,
Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Malaysia.

*Corresponding author: mardina@eng.ukm.my

