

Zeitschrift:	Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural
Herausgeber:	Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)
Band:	100 (2002)
Heft:	8
Artikel:	Modèle du retard troposphérique pour la navigation satellitaire
Autor:	Orliac, E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-235925

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 25.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Modèle du retard troposphérique pour la navigation satellitaire

Pour des applications de navigation satellitaire comme l'aviation, l'influence de l'atmosphère neutre sur la propagation du signal GPS (appelé retard «troposphérique» de propagation) doit être modélisée afin d'éliminer l'erreur induite sur la solution de position. Le modèle UNB3 a été développé dans le cadre général du Wide Area Augmentation System (WAAS) (voir Collins [1999]). Bien que performant, il s'est avéré que ce modèle produisait dans certains cas des valeurs d'humidité relative supérieures à 100%, ce qui est physiquement irréaliste. Une surestimation de l'humidité de l'air entraîne une surestimation du retard troposphérique et par voie de conséquence une erreur sur la position calculée. Une solution à ce problème est proposée.

Für die Anwendung der Satellitennavigation in der Fliegerei muss der Einfluss der neutralen Atmosphäre auf die Verbreitung des GPS-Signals (genannt «troposphärische» Verzögerung der Verbreitung) modelliert werden, um Fehler in der Lagebestimmung zu beseitigen. Das Modell UNB3 ist im allgemeinen Rahmen des Wide Area Augmentation System (WAAS) entwickelt worden (s. Collins [1999]). In gewissen Fällen ergibt dieses Modell relative Feuchtigkeitswerte über 100%, was physikalisch unrealistisch ist. Eine Überschätzung der Luftfeuchtigkeit ergibt eine Überschätzung der troposphärischen Verzögerung und folglich einen Fehler in der berechneten Position. Für dieses Problem wird eine Lösung vorgeschlagen.

Per delle applicazioni di navigazione satellitare come l'aviazione, l'influenza dell'atmosfera neutra sulla propagazione del segnale GPS (chiamato ritardo «troposferico» di propagazione) deve essere trasformata in un modello per eliminare l'errore indotto sulla soluzione di posizione. Il modello UNB3 è stato sviluppato nell'ambito generale del Wide Area Augmentation System (WAAS, vedi Collins 1991). Benché questo modello avesse ottime prestazioni, si è notato che produceva determinati livelli di umidità relativa superiori al 100%, fatto fisicamente irrealistico. Una sovrastima dell'umidità relativa dell'aria comporta una sovrastima del ritardo troposferico e, di conseguenza, un errore della posizione calcolata. Qui di seguito si propone una soluzione per questo problema.

E. Orliac

Introduction

Deux systèmes de navigation par satellites sont actuellement opérationnels. Il s'agit du Global Positioning System (GPS), système américain et du Global Navigation Satellite System (GLONASS), système russe. Tous deux sont sous contrôle militaire. Pourtant leurs apports à la navigation civile sont immenses. Les principaux domaines concernés sont l'aviation, la navigation maritime et fluviale, le transport

par rail ou encore la gestion du trafic routier. Mais leur réalisation nécessite un contrôle civil ainsi qu'une amélioration des performances des systèmes de bases, surtout dans le domaine de l'aviation. L'idée et la volonté de rendre GPS (et GLONASS) le premier instrument de navigation pour les avions ont conduit au développement de système d'amélioration du signal de base afin de le rendre conforme aux exigences de sécurité. Ces systèmes d'amélioration ont pour vocation de rendre le service de base offert par GPS plus intégré, plus fiable, plus disponible et plus précis, et ceci à l'échelle conti-

nentale. En ce sens, l'utilisateur reçoit des corrections à incorporer dans le calcul de sa position et un message d'alerte si un problème est détecté sur l'un des satellites. Dans le domaine de l'aviation, cette alerte doit être donnée en moins de 6 secondes.

WAAS

Le Wide Area Augmentation System est le système d'augmentation américain actuellement en cours de développement sous le parrainage de la Federal Aviation Administration (FAA). Ce système d'augmentation du signal est une application directe du concept de Wide Area Differential GPS (WADGPS). Le but du WAAS est de pouvoir servir d'instrument de navigation principal pour les approches de précision de catégorie I (altitude de décision supérieure à 200 ft et une visibilité supérieure à 2400 ft).

Pour deux récepteurs distants de 50 km on admet que le parcours du signal reçu de chaque satellite commun est le même, donc que les erreurs induites par l'atmosphère sont les mêmes. Cette limite de 50 km est due aux décorrélations spatiale et temporelle de l'atmosphère.

Un réseau de stations au sol, les WAAS Reference Station (WRS) observe continuellement la constellation de satellites et envoie les informations collectées à une WAAS Master Station (WMS). Celle-ci calcule alors un vecteur de corrections, qui contient principalement des corrections des positions des satellites (éphémérides), des corrections des horloges des satellites, ainsi qu'une grille de correction pour la ionosphère. Ces différentes composantes du messages sont séparées, ce qui permet des temps de mise à jour différents selon les corrections.

Les corrections sont transmises à l'utilisateur via un satellite géostationnaire, couvrant le continent Nord Américain. Le signal de ces satellites géostationnaires est similaire au signal GPS. Il est transmis à la fréquence L1 et modulé par un code de la même famille que ceux utilisés par chacun des satellites du GPS. Ces satellites géostationnaires augmentent donc la

qualité de la géométrie de la constellation, et par voie de conséquence, la qualité de la position calculée.

WAAS ne transmet pas seulement des corrections. Un monitorage du signal est proposé. Toute anomalie détectée dans le signal reçu d'un satellite est signalée à l'utilisateur dans un délai de 6 secondes. C'est en ce point que réside la différence majeure avec le DGPS. Le satellite géostationnaire apporte certes une amélioration dans la précision et la disponibilité du signal GPS mais le monitorage du signal apporte l'intégrité au système, c'est à dire qu'il permet d'augmenter la fiabilité du système, aspect primordial dans les domaines tels que l'aviation.

A l'heure actuelle l'Europe et le Japon développent aussi des systèmes d'augmentation. Ces systèmes, respectivement nommés European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS) et MSAS, sont conçus de manière similaire au WAAS. Une interopérabilité de ces systèmes est envisagée.

L'atmosphère neutre

Deux signaux sont fournis par GPS. Ils sont transmis par modulation de deux ondes électromagnétiques de fréquences 1575.42 MHz et 1227.60 MHz respectivement nommées L1 et L2. Pendant son parcours de 20000 km qui sépare le satellite de l'antenne du récepteur, le signal électromagnétique subit l'influence de deux parties de l'atmosphère. La première, la ionosphère qui est un milieu électrique: les molécules sont ionisées par le rayonnement solaire, induisant la présence d'électrons libres dans l'atmosphère. Ce milieu est dit dispersif, en ce sens qu'il affecte le signal électromagnétique selon sa fréquence. La ionosphère se situe grossièrement entre 50 et 1000 km d'altitude. La deuxième partie, en dessous de 50 km d'altitude est électriquement neutre. Elle correspond à la troposphère et à la stratosphère. Ce milieu est non dispersif. En géodésie spatiale, l'effet induit sur le signal GPS est communément appelé erreur ou retard troposphérique car la plus grande partie de l'erreur induite provient

de la troposphère. La dispersion est une propriété dont les utilisateurs travaillant avec des récepteurs bi-fréquence peuvent tirer avantage pour mesurer et éliminer l'erreur ionosphérique. Par contre, l'erreur troposphérique doit être modélisée. Son amplitude passe de 2.5 mètres environ pour un satellite au zénith à plus de 25 mètres pour un satellite à un angle d'élévation de 5°. Dans le cadre du WAAS, elle intervient deux fois: elle affecte les observations faites par les WRS (observations desquelles sont tirées les corrections envoyées à l'utilisateur), mais aussi les signaux reçus par l'utilisateur. Le modèle troposphérique considéré ci-après, le modèle UNB3, est un modèle développé par University of New Brunswick, qui a remplacé le modèle originalement proposé pour WAAS.

L'erreur troposphérique peut être divisée en deux parties. La première, dite hydrostatique et comptant pour environ 90% de l'erreur, est induite par les gaz en équilibre hydrostatique. La deuxième partie, qualifiée d'humide, est induite par la vapeur d'eau et compte pour les 10% restants. La teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère neutre est extrêmement va-

riable temporellement et spatialement. Ceci explique pourquoi une correction n'est pas fournie à l'utilisateur dans le message de correction. Le réseau de stations au sol n'a pas la densité suffisante pour prendre en compte les variations spatiales et temporelles de l'humidité. Il incombe donc à l'utilisateur de modéliser l'erreur troposphérique.

Le retard troposphérique

Le retard troposphérique est connu si l'indice de réfraction de l'atmosphère est connu le long du trajet du signal. L'indice de réfraction de l'atmosphère neutre est légèrement supérieur à 1 (≈ 1.0003 au niveau de la mer et plus proche de 1 à la limite supérieure de l'atmosphère neutre). De fait, il apparaît un retard de propagation par diminution de la vitesse de propagation et, selon la loi de Snell, une courbure du rayon conduisant à une augmentation de la longueur du trajet, surtout pour les faibles angles d'élévation. La détermination du retard troposphérique se fait usuellement en deux temps:

1. calcul du retard troposphérique zénithal;

Averages (ξ_{avg})					
Latitude [Degree]	P [mbar]	T [K]	e [mbar]	β [K.km $^{-1}$]	λ [-]
15	1013.25	299.65	26.31	6.30	2.77
30	1017.25	294.15	21.79	6.05	3.15
45	1015.75	283.15	11.66	5.58	2.57
60	1011.75	272.15	6.78	5.59	1.81
75	1013.00	263.65	4.11	4.53	1.55
Amplitudes (ξ_{amp})					
Latitude [Degree]	P [mbar]	T [K]	e [mbar]	β [K.km $^{-1}$]	λ [-]
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	-3.75	7.00	8.85	0.25	0.33
45	-2.25	11.00	7.24	0.32	0.46
60	-1.75	15.00	5.36	0.81	0.74
75	-0.50	14.50	3.39	0.62	0.30

Tab. 1: Table de référence du modèle UNB3.

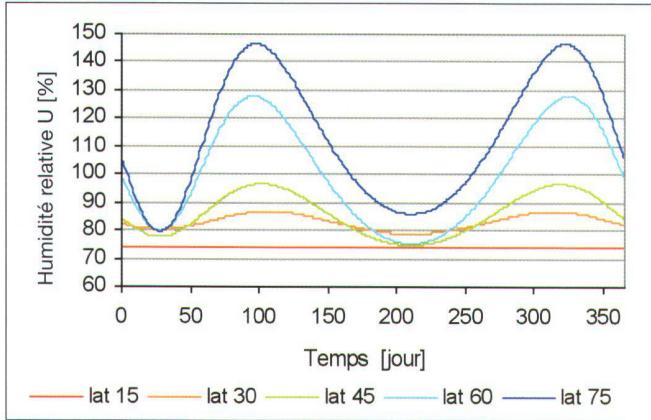


Fig. 1: Humidité relative calculée au niveau de la mer par le modèle UNB3.

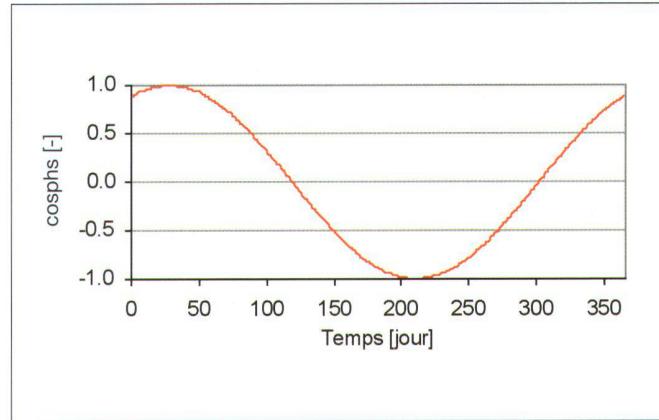


Fig. 2: Fonction cosphs.

2. amplification dans la direction du satellite via un facteur d'obliquité ou mapping function.

Ce qui conduit à la formulation habituelle du retard troposphérique:

$$d_{\text{trop}} = d_{\text{hyd}}^z \cdot m_{\text{hyd}} + d_{\text{wet}}^z \cdot m_{\text{wet}} \quad (1)$$

où d_{trop} est le retard troposphérique total, d_{hyd}^z est le retard zénithal hydrostatique, d_{wet}^z est le retard zénithal humide (dû à la vapeur d'eau) et m_{hyd} et m_{wet} sont les facteurs d'obliquité ou mapping functions pour les retards hydrostatique et humide respectivement.

Le modèle UNB3 utilise les formulations de Saastamoinen pour calculer les retard zénithaux hydrostatiques et humides:

$$d_{\text{hyd}}^z = \frac{10^{-6} k_1 R_d}{g_m} \cdot P \quad (2)$$

$$d_{\text{wet}}^z = \frac{10^{-6} (T_m k_2 + k_3) R_d}{g_m (\lambda + 1) - \beta R_d} \cdot \frac{e}{T} \quad (3)$$

où P est la pression, λ (sans unité) est le gradient de vapeur d'eau, β (Km^{-1}) est le gradient de température, g_m représente l'accélération de gravité, R_d est la constante spécifique des gaz pour l'air sec (gaz comprenant tous les gaz autres que la vapeur d'eau), k_1 , k_2 et k_3 sont des constantes de réfraction.

$$T_m = T \left(1 - \frac{\beta R_d}{g_m (\lambda + 1)} \right)$$

est la température moyenne de la vapeur d'eau.

Selon Mendes [1999] la mapping fonction établie par Niell [1996], est la plus performante. Elle nécessite seulement la latitude et l'altitude (pour la position) ainsi que le jour de l'année (pour le temps) comme information pour établir le facteur d'obliquité. Aucune information météorologique en temps réel n'est nécessaire.

Le modèle UNB3

Le modèle UNB3, basé sur le concept de Niell, doit appréhender l'état de l'atmosphère sans informations météorologiques fournies en temps réel. A partir d'une table de référence (look up table) naturellement prise au niveau de la mer, toutes les informations météorologiques nécessaires sont calculées selon l'altitude, la latitude et le jour de l'année.

La table de référence présentée en figure 1 est dérivée de United States Standard Atmosphere, document décrivant l'état moyen de l'atmosphère. L'atmosphère est décrite pour 5 latitudes bornes définissant 6 bandes. Pour une latitude ϕ comprise entre deux bornes ϕ_i et ϕ_{i+1} , on procède par interpolation linéaire, selon l'expression donnée par Collins & Langley [1999]:

$$\xi(\phi, t) = \xi_{\text{avg}}(\phi_i) + [\xi_{\text{avg}}(\phi_{i+1}) - \xi_{\text{avg}}(\phi_i)] \cdot m - [\xi_{\text{amp}}(\phi_i) + [\xi_{\text{amp}}(\phi_{i+1}) - \xi_{\text{amp}}(\phi_i)] \cdot m] \cdot \cosphs(t) \quad (4)$$

où ξ est l'un des 5 paramètres (T , P , e , β ,

λ) présentés ci-dessous, et t représente le jour de l'année considéré. ξ_{avg} et ξ_{amp} sont les valeurs issues de la table de référence associées à une latitude borne. m est défini comme suit:

$$m = \frac{\phi - \phi_i}{\phi_{i+1} - \phi_i} \quad (5)$$

Pour modéliser la variation temporelle des facteurs ξ , la fonction cosphs est introduite dans l'interpolation.

$$\cosphs(t) = \cos([t - 28] \cdot \frac{2\pi}{365.25}). \quad (6)$$

Avec la température T , la pression P , la pression (partielle) de vapeur d'eau e , le gradient de température β (constant) et le gradient de vapeur d'eau λ , assumant une décroissance linéaire de la température avec l'altitude:

$$T = T_0 - \beta \cdot H. \quad (7)$$

Assumant aussi l'équilibre hydrostatique et le comportement des gaz parfaits:

$$P = P_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_d \beta}}, \quad (8)$$

ainsi qu'une décroissance exponentielle de la concentration de vapeur d'eau selon l'altitude:

$$e = e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{(\lambda + 1) g}{R_d \beta}}, \quad (9)$$

tous les éléments nécessaires sont réunis pour calculer le retard troposphérique zé-

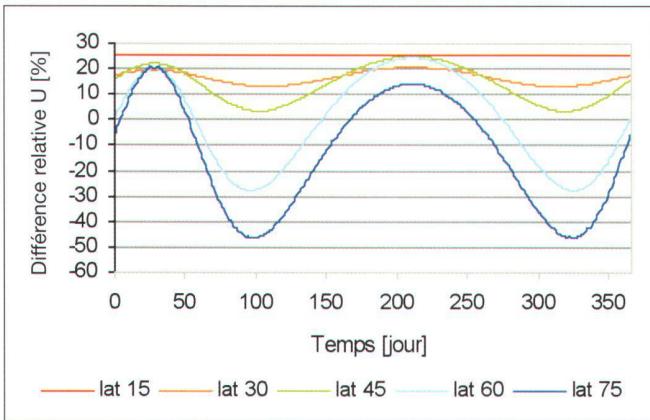


Fig. 3: Différence relative entre e et e_s .

nithal via l'expression de Saastamoinen et pour le magnifier selon tout angle d'élévation.

UNB3 Web Site

Une interface temps réel est proposée à l'adresse électronique suivante: <http://gauss.gge.unb.ca/UNB3/general.html> qui permet à quiconque de faire tourner le modèle UNB3. En options, les composantes hydrostatique et humide peuvent être affichées.

Surestimations de l'humidité relative

Considérons un volume d'air à la température T , à une pression totale P et possédant une pression partielle de vapeur d'eau e . Le volume d'air est dit saturé en vapeur d'eau quand e atteint la valeur de saturation e_s calculée selon l'équation de Clausius-Clapeyron:

$$e_s = e_{s0} \exp\left(\frac{L_v}{R_w}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right), \quad (10)$$

où e_{s0} est la pression de saturation de référence, L_v est la chaleur latente de vaporisation, R_w la constante spécifique des gaz pour la vapeur d'eau, T_0 la température de référence. Quand l'air est saturé, la vapeur d'eau commence à coexister avec l'eau liquide ou solide selon la température.

L'humidité relative U est très convenablement approchée par l'équation:

$$U(\%) = 100 \frac{e}{e_s} \quad (11)$$

La figure 1 décrit le problème rencontré quand U est calculée avec les données météorologiques issues du modèle UNB3. Les problèmes apparaissent durant deux périodes (de mars à mai et d'octobre à décembre) et ce pour les hautes latitudes. Les valeurs de e et de e_s sont faibles et proches.

La figure 2 met en avant la corrélation entre les surestimations de U et la fonction cosphs. Les surestimations apparaissent quand l'amplitude de cosphs est faible, ce qui signifie que peu d'importance est donnée à ξ_{amp} comparée à celle accordée à ξ_{avg} . Cela peut signifier soit que ξ_{avg} est surévaluée soit que cosphs est mal adaptée.

La figure 3 représente la différence relative entre e et e_s et montre le problème de sensibilité du modèle à une mauvaise estimation de la quantité de vapeur d'eau e contenue dans l'air dans le calcul de l'humidité relative. Les problèmes de surestimation sont pleinement corrélés aux périodes où une légère surestimation de e conduit à de grandes surestimations de U car e et e_s sont de faible amplitude. Pour régler le problème, on propose de remplacer la source d'information pour le contenu de l'air en humidité: au lieu d'utiliser la pression de vapeur d'eau on utilise directement l'humidité relative (issue de U.S. Standard Atmosphere).

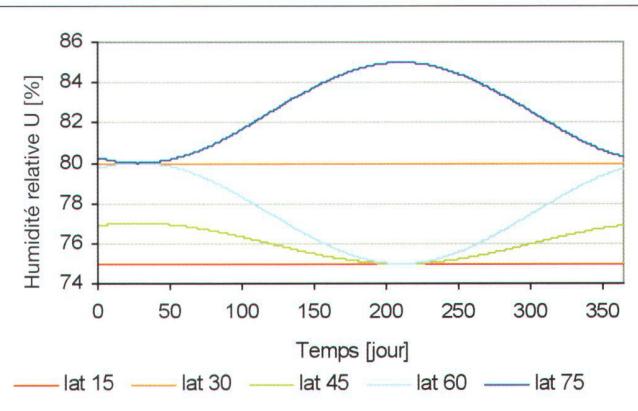


Fig. 4: Humidité relative produite par le modèle modifié.

Le modèle ainsi modifié produit les valeurs suivantes pour l'humidité relative:

Ce changement a plusieurs effets positifs sur les performances du modèle:

- Le problème de surestimation de l'humidité relative est résolu.
- Le modèle résiste mieux à une erreur produite sur le calcul de la quantité d'humidité contenu dans l'air.
- Environ 65% de la partie déterministe de la modélisation de l'erreur résiduelle du retard troposphérique est expliquée. La valeur de référence est obtenue par la technique du ray-tracing pour 173 stations de radiosondes dispersées sur le continent Nord-américain et pour une période de 10 ans. Ces résultats sont présentés de manière complète dans Collins & Langley, [1999].

Cette dernière est représentée en noir sur la figure 4 conjointement aux différences

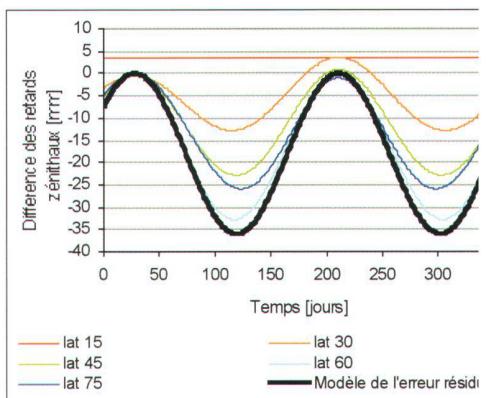


Fig. 5: Différence des retards troposphériques entre le modèle original et le modèle modifié.

observées entre le modèle original et le modèle modifié dans la détermination du retard troposphérique zénithal.

La majeure partie de l'erreur résiduelle provient des latitudes supérieures à 40°. Comme précédemment cité, les basses latitudes semblent beaucoup mieux modélisées que les hautes. Via cette amélioration du modèle, la distribution des résidus se rapproche d'une distribution aléatoire non biaisée, but recherché de la modélisation.

Conclusion

Une solution au problème de surévaluation de l'humidité relative a été apportée durant ce travail. Bien qu'a priori elle améliore les performances du modèle, l'incidence sur le calcul des positions demeure à vérifier. Ceci pourrait être effectué à l'aide d'un logiciel de simulation.

Références:

Collins, J. P. and R. B. Langley (1999), Nominal and Extreme Error Performance of the UNB3 Tropospheric Delay Model. Final contract report for Nav Canada Satellite Navigation Program Office, by the geodetic Research Laboratory, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 204, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 173pp.

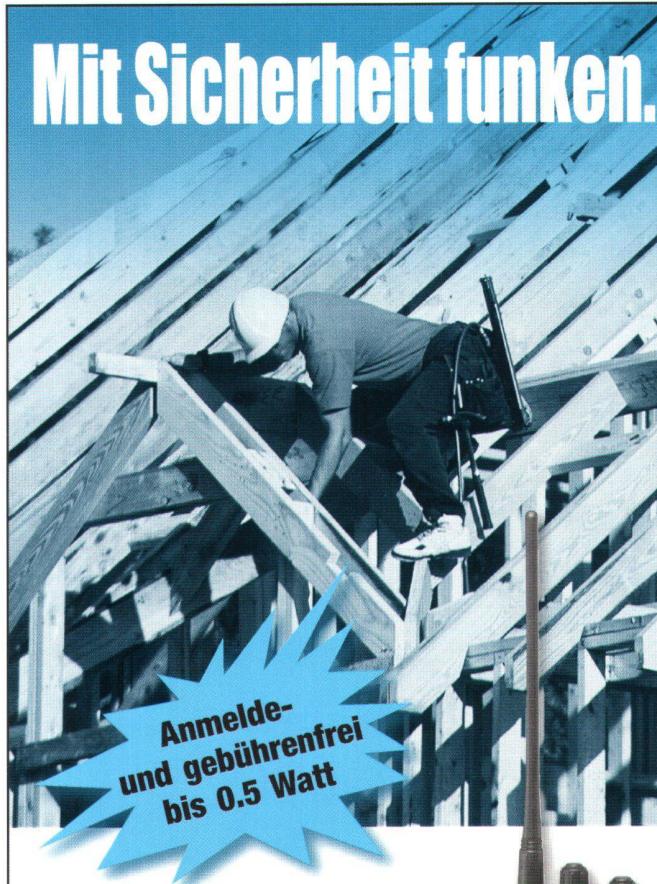
Collins, J. P. (1999), Assessment and Development of a Tropospheric Delay Model for Aircraft Users of the Global Positioning System. M.Sc.E. thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 203, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 174 pp.

Dubin, M., N. Sissenwine and S. Teweles (1966). U.S. Standard Atmosphere Supplements, 1966. U.S. Committee on Extension to the Standard Atmosphere. U.S. Government Printing Ofiice, Washington, DC.

Mendes, V. B. (1999), Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques. Ph.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 353 pp.

Niell, A. E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. B2, pp. 3227–3246.

Etienne Orliac
Chemin de Volson 4
CH-1009 Pully
etienne@orliac.com



Ideal, günstig, schnell und sicher.
Überall wo rationell gearbeitet wird.
Für Industrie, Bau, Unterhalt- und
Servicedienste.

PMR 446

0.5 Watt

CHF 385.–

Handy 430

2.5 Watt

CHF 459.–



Betriebsbereit, mit Akku und Ladegerät.

KENWOOD
The Power of Communication.

JA, ich möchte mit KENWOOD funkeln.

Bitte senden Sie mir weitere Gratisinformationen.

Name/Vorname

Firma

Strasse

PLZ/Ort

Telefon

Telefax

E-Mail

VPK 8/02 200221



ALTREDA

Altreda AG
Max-Högger-Strasse 2, CH-8048 Zürich
Telefon 01 432 09 00, Telefax 01 432 09 04
info@altreda.ch, www.altreda.ch