

3F15 移動体向け広域型ネットワーク RTK システムの検討

○ 高須知二、海老沼拓史、安田明生（東京海洋大学）

A Feasibility Study of Wide Area Network RTK System for Mobile Users

Tomoji Takasu, Takuji Ebinuma, Akio Yasuda (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Key Words: QZSS, LEX, Network RTK, Wide Area Differential GPS

Abstract

This paper describes a feasibility study of a wide-area Network-RTK system for mobile users. The system provides Network-RTK service using a satellite. The size of the correction data should be reduced to be transmitted via a limited bandwidth of the communication link. The study shows that the proposed system is capable of providing a cm-level positioning accuracy to mobile users all over Japan with 1.7 Kbps bandwidth of the QZSS LEX signal.

1. はじめに

RTK-GPS (Real-time Kinematic GPS) は GPS/GNSS を使って利用者位置をセンチメートル級の精度で求める精密測位技術である。従来型 RTK-GPS では基準局と観測点の両者に受信機を設置して両者間の相対位置 (基線) を決める相対測位の手法をとる必要があった。近年、分散した多数の基準局網の観測データから RTK-GPS 用補正情報を生成し、その情報を利用することにより単独の受信機のみで精密位置を求めることができるネットワーク RTK 技術が開発され、各種の応用分野で利用が始まっている。日本でも国土地理院の電子基準点網を利用した商用ネットワーク RTK サービスが既に開始されている [1]。

既存の多くのネットワーク RTK システムでは利用者に補正情報を送信するために携帯電話回線を使う。そのため、山間地や過疎地域等の携帯電話通話エリア外ではサービスが利用できないこと、連続的な回線使用のため通信コストが過大になりやすいこと、障害物が多い環境では回線中断の影響で運用性が落ちること等、移動体の精密測位に応用する場合には問題が多かった。これら問題点の多くは衛星放送により補正情報を配信することにより解決可能である。しかしながら、従来型ネットワーク RTK システムでは広域利用者に補正情報を一括送信することを想定していないため、衛星を利用する場合、大容量のデータ伝送帯域が必要となり実用的とは言えなかった。

さて日本では 2009 年度中の初号機打上げを目標に準天頂衛星 (QZSS: Quasi-Zenith Satellite System) 計画が進められている [2]。QZSS は日本及び周辺領域

において測位、航法等の利用者に高精度の衛星測位サービスを提供する。QZSS の測位信号のうち周波数 1278.75MHz の LEX 信号は 2 Kbps のメッセージ伝送性能を有しており、デシメートル・センチメートル級の高精度測位補強実験に利用することが予定されている。本研究では QZSS LEX 信号を使って、日本全国で移動体のセンチメートル級測位を可能とする広域型ネットワーク RTK システムの技術検討を行った。

2. 既存測位補強システムの課題

表 1 に日本域で利用可能な高精度測位補強システムの比較を示す。

MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System) [3] は MTSAT 衛星により DGPS 補正情報を配信するもので、コード測位利用者の補強を目的としておりセンチメートル級の測位精度は達成できない。

GDGPS (Global Differential GPS) [4] も衛星ベースの高精度測位補強システムであり、海上を含めた世界中でサブデシメートル級の測位精度を実現する。ただし整数バイアス決定ができないため解の収束時間が長い点が特に移動体応用においては不利になる。

従来型ネットワーク RTK システムとしては VRS (Virtual Reference Station) 方式と FKP (Flächen Korrektur Parameter) 方式がある。VRS 方式は仮想基準点位置を決定するため利用者データをサーバに送信する必要があり放送型システムでは利用できない。FKP 方式では実基準点観測値と補正パラメータを補正情報として配信する。日本で運用中の FKP 方式システムでは約 300 局の電子基準点観測データから 1

秒毎の補正情報を生成している。ただし 1 局分の補正情報が有効なのは高々半径数 10 km 以内の範囲であり、日本全国の利用者に有効な補正情報を配信するためには 1 Mbps 以上のデータ伝送帯域が必要になる。補正情報送信に衛星放送を利用する場合には小型・簡易なアンテナで受信することは難しく移動体利用者にとって使いやすいシステムは言えない。

3. QZSS LEX 信号

検討する広域型ネットワーク RTK システムは QZSS LEX 信号を利用して補正情報を利用者に配信する。QZSS LEX 信号のメッセージ構造を図 1 に示す。QZSS LEX 実効メッセージサイズは 1 フレーム 1695 bits であり、1 フレームは 1 秒周期で送信されるので実効データレートは 1695 bps となる。

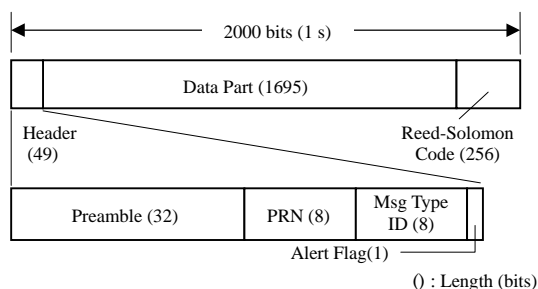


図 1 QZSS LEX メッセージ構造 [5]

4. 補正情報の検討

4-1 SSR (State Space Representation)

一般に距離の近い GPS/GNSS 受信機の観測値には関連の高い共通測位誤差項が含まれる。ネットワーク RTK ではこの空間相関を利用して、利用者近傍の測位誤差項を複数の周辺基準局観測値の補間で求め、利用者受信機の観測値を補正して最終的な RTK-GPS 解を求める。従来型ネットワーク RTK システムでは補正情報として仮想基準点観測値や実基準点観測値+補正パラメータが配信される。この場合、測位誤差項は個々の構成要素に分離されないまま一括して補正に使われることになる。

これに対して測位誤差項を個別に、すなわち衛星軌道・時計、電離層遅延、対流圏遅延等に分離して補正を行う方式が検討されており SSR (State Space Representation) と呼ばれている [6]。SSR では各測位誤差項毎の補正情報をそれぞれ最適な空間分解能、データレートで送信することが可能であり、従来型システムに比較して飛躍的にデータ伝送量を削減することが可能になる。本システムでも QZSS LEX 信号の限定されたデータ伝送帯域を効率的に利用して全補正情報を送信する必要があり SSR を採用するものとした。なお、SSR については RTCM SC-104 委員会でワーキンググループが組織され補正メッセージの標準化活動が開始されている [7]。

4-2 測位誤差時間変動

SSR において個別補正情報の最適更新間隔を決定するためには、各測位誤差項がどの程度時間変動す

表 1 日本域で利用可能な主な高精度測位補強システムの比較

System		Proposed System	VRS	FKP	GDGPS (StarFire™)	MSAS
Service Area		All Japan (Land)	All Japan (Mobile Phone Service Area)	All Japan (Mobile Phone Service Area)	Worldwide (Land/Sea)	East-Asia Region (Land/Sea)
Correction Info.	Contents	Sat Orbit/Clock, Ionos (Slant), Tropos (ZWD), Code/Phase Bias	VRS Observation	Ref Station Observation, FKP	Satellite Orbit/Clock	Sat Orbit/Clock, Ionos (IGP), Fast Corr, Integrity
	Comm. Link	QZSS LEX	Mobile Phone	Mobile Phone	Satellite (Inmarsat)	Satellite (MTSAT)
	Message Rate	1.7 Kbps	4.8 Kbps/User (Bidirectional)	4.8 Kbps/User	1.2 Kbps	250 bps
Accuracy (Horiz. RMS)	Single-Frequency	1 - 5 cm	1 - 3 cm	1 - 3 cm	(No Support)	50 cm
	Dual-Frequency	1 - 3 cm	1 - 3 cm	1 - 3 cm	10 cm	-
Time To First Fix	Single-Frequency	3 - 30 min	3 - 10 min	3 - 10 min	(No Support)	10 s - 1 min
	Dual-Frequency	30 s - 3 min	3 s - 1 min	3 s - 1 min	10 - 30 min	-
Mobile Application		Yes	No	Yes	Yes	Yes
Actual System		Concept Level	Commercial Service	Commercial Service	Commercial Service	Operational (2007/9-)

るかを正確に把握する必要がある。図1に衛星軌道・時計誤差及び電離層遅延の時間変動分布を示す。衛星軌道誤差、電離層遅延に関しては30秒、衛星時計誤差に関しては3秒での変動量の頻度分布を表している。解析にあたっては2008年8月の放送暦(Ephemeris)を用い精密暦(IGS Final、CODE 5s Clock)を基準とした誤差の時間変動を統計解析した。電離層遅延については同一期間の電子基準点つづば1の二周波搬送波位相観測値から電離層遅延成分を抽出してマッピング関数を使って鉛直遅延量に変換している。

4-3 衛星軌道・時計

本システムの衛星軌道・時計補正情報は放送暦による衛星位置・速度を基準とした誤差とする。衛星軌道誤差の時間変動は緩やかであり補正情報の更新間隔は30秒とする。衛星軌道誤差に比較して衛星時計誤差は高速でランダムな時間変動をするため十分短い更新間隔で補正情報を送信する必要がある。現行のRTK-GPSでも5秒程度の伝送遅延が性能劣化を起こさない限界とされていることから更新間隔は3秒とする。図1によりこの更新間隔での補外誤差はそれぞれ数mm以下であることが分かる。

これらの補正情報と共に対象となる放送暦を識別するためのIOD(Issue of Data)を送信する。対象とする衛星は標準的な受信機のチャンネル数を考慮し最大12機とし、日本近傍で可視となる衛星から条件の良いものを選択する。当初はGPS衛星のみを対象とするが、GalileoやGLONASS等、他の測位衛星システムへの対応を考慮し補正情報メッセージに衛星システムIDを含めるものとする。

4-4 電離層遅延

電離層遅延は時間的・空間的に変動が大きく補正情報のデータ伝送量削減上重要な測位誤差項である。

従来型ネットワークRTKの基準点間隔は50km~100km程度に取られることが多く、その程度の空間分解能が一つの目安となる。本システムでは、緯度0.5度、経度0.6度、距離にして約55km間隔で日本全国の陸域(離島を除く)をカバーする地表補正格子点を考え、各格子点から対象衛星への視線方向スラントL1電離層遅延を補正情報とするものとする。図2に地表補正格子点構成案を示す。補正情報のビット数を削減するため、これら格子点のうち約110km間隔の点を主格子点、それ以外を副格子点として副格子点の補正量は主格子点を基準とした相対値とする。電離層補正情報の利用により一周波受信機によるRTK-GPS測位も可能となる。

電離層遅延は太陽活動活発期や太陽フレア等の発生時に高速で大きな変動が発生することが知られている。従ってできるだけ高頻度の補正情報更新が望ましいがQZSS LEX信号のデータ伝送帯域制限を考慮して更新間隔を30秒とする。図1から電離層静穏時であれば概ね補外誤差は1cm以下に押さえられることがわかる。なお二周波受信機を利用する場合は二周波観測値を使って電離層遅延を補正することにより、測位精度を向上させることが可能である。

4-5 対流圏遅延

対流圏補正情報は主格子点における天頂水蒸気遅延量(ZWD: Zenith Wet Delay)とする。利用者は近傍格子点遅延量を補間した後、適当な静水圧遅延モデルとマッピング関数により最終遅延補正量に変換す

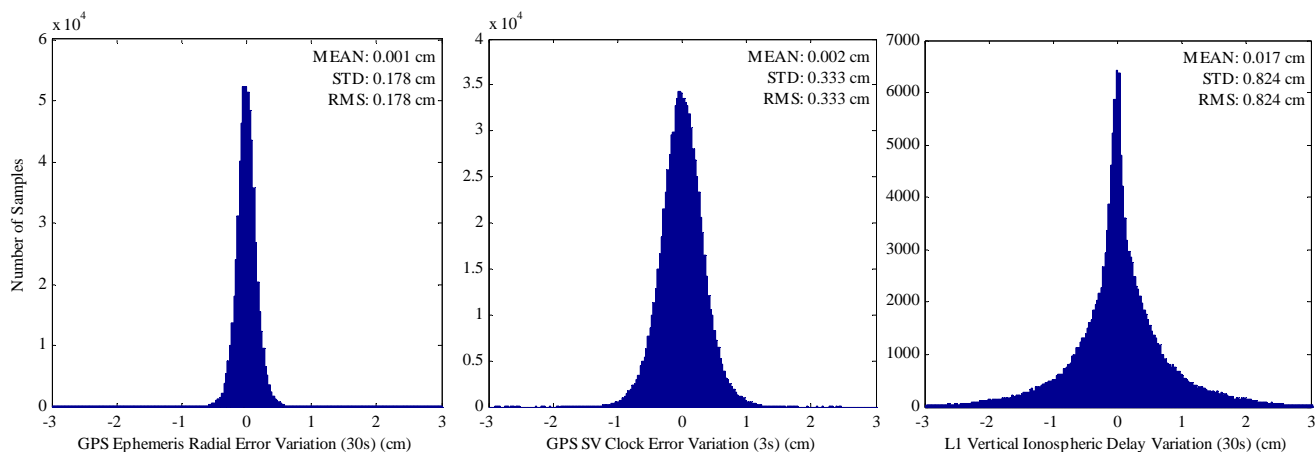


図1 測位誤差項の時間変動頻度分布
(左: Ephemeris Radial Error 30s、中: SV Clock Error 3s、右: L1 Vertical Ionospheric Delay 30s)

る。一般に対流圏遅延は時間変動が緩やかで数分以上の時定数を持ち補正情報の更新間隔は十分に長くても良いため、更新間隔は 30 秒とした。

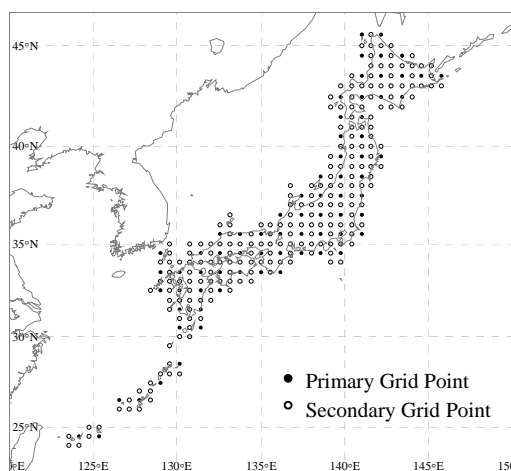


図 2 地表補正格子点構成案

4-6 搬送波位相・コード間バイアス

搬送波位相観測値に含まれる搬送波位相バイアスは、衛星・受信機初期位相項と整数バイアスに分離できる。従来型 RTK-GPS では二重位相差により初期位相項を消去する機会が多いが、広域型ネットワーク RTK システムでは基準局観測値から推定した衛星初期位相項を補正情報に含める必要がある。利用者受信機ではこれらの補正情報を搬送波位相観測値から差し引いた上で衛星間差分をとることにより二重位相差と同等の観測値が得られる。これら観測値を使って推定した整数バイアスを解いて整数 FIX することにより最終的な精密測位解 (FIX 解) が得られ

る。これらの補正情報は搬送波毎に必要であり、L1、L2 に加えて GPS Block IIF 衛星から追加される L5 用補正量を補正情報に含めるものとする。なお衛星 Phase-Windup 効果については広域サービス域においては無視できない誤差要因となるため利用者受信機で適当なモデルを使って補正する必要がある。

コード疑似距離に含まれるコード間バイアスに関しても RTK-GPS 初期化性能に影響を与えるため補正が必要である。本システムでは L1P-L2P 電離層フリー疑似距離を基準とした L1C/A、L2C、L5 コード疑似距離バイアスを補正情報に含めるものとした。

4-7 補正情報データ量

以上のネットワーク RTK 用補正情報に加えて、衛星 ID、品質管理情報、地表補正格子点の版、補正時刻、フレーム番号等が補正情報メッセージを構成するために必要になる。

表 2 にこれら補正情報毎のビット数、分解能、実効レンジ、更新間隔とデータ伝送量の見積を示す。表 2 に示すように QZSS LEX 信号 1695 bps のデータ伝送帯域を使って想定される全補正情報を送信可能であり、提案する本広域型ネットワーク RTK システムがデータ伝送量的に成立することが分かった。

4-8 利用者測位性能の検討

以上の補正情報を前提として利用者測位性能を検討した。表 3 に本システムによる利用測位精度の見積を示す。ここで各測位誤差項の補正誤差には補正情報推定誤差、量子化誤差、空間補間誤差、時間補外誤差が含まれる。表 3 に示すように概ねセンチメ

表 2 広域型ネットワーク RTK システム補正情報 データ伝送容量見積

Correction	# of Bits (bits)	Scale Factor (LSB)	Effective Range	# of Satellites	# of Grid Points	Update Interval (s)	Band-Width (bps)	Notes
Satellite Orbit	15×3	0.002 m	-33 to 33 m	12	-	30	18	dx/dy/dz *3
	15×3	0.02 mm/s	-0.3 to 0.3 m/s	12	-	30	18	dvx/dvy/dvz *3
Satellite Clock	15	0.006 ns	-98 to 98 ns	12	-	3	60	
Ionospheric Delay	15	0.002 m	0 to 66 m	12	70 *1	30	420	Satellite-Grid Slant
	13	0.002 m	-8 to 8 m	12	210 *2	30	1092	Relative to Pri Grid
Tropospheric Delay	11	0.0005 m	0 to 1 m	-	70 *1	30	26	ZWD at Pri Grid
Satellite Code Bias	8×3	0.1 m	-13 to 13 m	12	-	30	10	L1C/A, L2C, L5 *4
Satellite Phase Bias	11×3	0.01 cyc	-10 to 10 cyc	12	-	30	13	L1, L2, L5 *4
Satellite ID + IOD	8 + 8	-	-	12	-	30	6	NavSystem ID+PRN
Quality Indicator	8×4	-	-	12	-	30	13	
Grids ID/version	8 + 8	-	-	-	-	30	1	for Ionos/Tropos
Correction Time	24	-	-	-	-	3	8	
Version, Frame No	4 + 6	-	-	-	-	1	10	
Total							1695	

*1 Primary Grid, *2 Secondary Grid, *3 Correction of Broadcast Ephemeris, *4Relative to L1P-L2P Iono-Free LC Code Phase

ータ級の測位精度が達成できることが分かった。

実用的には RTK-GPS の測位性能として初期化性能が非常に重要である。特に移動体測位への応用においてはビルディング、樹木等の周辺障害物の影響で測位信号中断やサイクルスリップが多発する場合が多いため、再初期化時間の短さは測位解の可用性に直結する。ただし初期化性能は衛星配置、上空視界、周辺障害物、使用アンテナ等測位条件によって大きく異なるため、現実環境での値を見積もるのは難しい。ここでは従来型ネットワーク RTK システムの類推から一周波受信機で 3~30 分、二周波受信機で 30 秒~3 分を目標値としておく。これらの測位性能については今後プロトタイプシステムの実装と共に実環境での評価を進めていく必要がある。

表 3 利用者 RTK-GPS 測位精度見積

誤差項	利用者受信機	
	一周波	二周波
衛星軌道+衛星時計補正誤差	1.5 cm	1.5 cm
電離層遅延補正誤差	2.0 cm	—
対流圏遅延補正誤差	0.6 cm	0.6 cm
バイアス補正誤差	0.0 cm *1	0.0 cm *1
搬送波マルチパス+受信機誤差	0.3 cm *2	0.9 cm *3
衛星配置	HDOP	1.5
	VDOP	3.0
測位精度 (RMS)	水平	3.3 cm
	垂直	7.8 cm

*1 FIX 解, *2 測量級アンテナ, *3 電離層フリー LC

4.9 利用者補正アルゴリズムの検討

図 3 に本システムの補正情報を使った利用者補正

アルゴリズムを示す。図 3 に示した観測方程式の衛星間差分を取ることで受信機時計誤差と受信機初期位相項が消去されるので、最小二乗法等を使って受信機位置及び整数バイアスを推定する。推定した整数バイアスを通常の RTK-GPS の手法により解いて整数 FIX することにより RTK-GPS 測位解を求めることができる。

5. システム構成・機能の検討

5-1 システム構成

(1) 基準局網

基準局網としては国土地理院電子基準点を利用する。地表補正格子点間隔を考慮して従来型システムと同様に 300 局程度の基準点を利用するものとする。

(2) データセンタ

基準局網の GPS/GNSS 観測データはオンライン回線を介してリアルタイムでデータセンタに送信される。データセンタの解析サーバはこれらのデータを一括処理し広域型ネットワーク RTK 補正情報を生成する。生成された補正情報は QZSS LEX 用メッセージ形式に変換され QZSS 地上システムに送信される。

(3) QZSS

補正情報は QZSS にアップリンクされ QZSS LEX 信号リンクを介して地上利用者に放送される。

(4) 利用者

QZSS LEX 受信機により補正情報を受信する。同時に取得した GPS/GNSS 観測データを前章で示した補正アルゴリズムにより解析することにより RTK-GPS 解を取得することができる。GPS/QZSS LEX 対応受信機に以上の補正アルゴリズムが実装されれば利用者の利便性が高まると思われる。また既存 RTK-GPS 用受信機を利用するため、補正情報から仮想基準点観測データを生成し RTCM 形式で出力する QZSS LEX 専用受信機も有効になる。

$$\lambda_i \Phi_{ir}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dT^s - \Delta dT^s) - f_1^2 / f_i^2 I_r^s + T + mZWD_t + \lambda_i(\phi_{ir} - \phi_i^s + N_r^s + \Delta\phi_r^s) + \Delta_r + \varepsilon_q$$

$$P_{ir}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dT^s - \Delta dT^s) + f_1^2 / f_i^2 I_r^s + T + mZWD_t + DCB_t + \Delta_r + \varepsilon_p$$

$$\rho_r^s = \left\| \mathbf{r}^s + \Delta \mathbf{r}^s - \mathbf{u}_r - \Delta \mathbf{u}_r \right\| \approx \left\| \mathbf{r}^s - \mathbf{u}_r \right\| + \mathbf{e}_r^T \cdot (\Delta \mathbf{r}^s - \Delta \mathbf{u}_r)$$

Φ_{ir}^s : Carrier Phase Measurement, P_{ir}^s : Pseudorange Measurement, ρ_r^s : Satellite - Receiver Geometric Range, dt_r : Receiver Clock Bias

\mathbf{r}^s : Satellite Position, $\Delta \mathbf{r}^s$: Satellite Position Correction, dT^s : SV Clock Bias, ΔdT^s : SV Clock Correction, ZWD: Zenith Wet Delay,

DCB: Differential Code Bias, ϕ_{ir} : Receiver Initial Phase, ϕ_i^s : Satellite Initial Phase, N_r^s : Integer Ambiguity, $\Delta\phi_r^s$: Phase - Windup Correction,

Δ_r : AntennaPhaseCenterVariation, $\varepsilon_q, \varepsilon_p$: Measurement Error, c : Speed of Light, f_i : Carrier Frequency, λ_i : Wave Length, \mathbf{u}_r : Receiver Position,

T : Hydrostatic Delay, m : Tropospheric Mapping Function, $\Delta \mathbf{u}_r$: Earth - Tide Correction, \mathbf{e}_r^T : Receiver - Satellite LOS Vector

図 3 広域型ネットワーク RTK 利用者補正アルゴリズム

5-2 補正情報の生成

図 4 にデータセンタにおける補正情報生成フローを示す。従来型ネットワーク RTK システムと同様に、衛星軌道誤差、時計誤差、電離層遅延、対流圏遅延、搬送波位相バイアス等をモデル化し、基準局網の GPS/GNSS 観測データをカルマンフィルタで処理してモデルパラメータを逐次推定する。電離層遅延、対流圏遅延については地表補正格子点値に補間することにより最終的な補正情報が得られる。

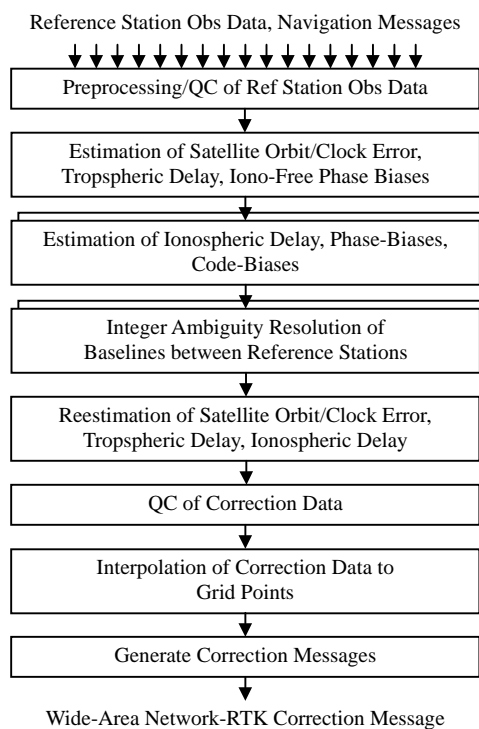


図 4 補正情報生成フロー

5-3 計算機資源の低減

従来型ネットワーク RTK システムと異なり、本システムでは大規模基準局網の全データを一括解析して単一の補正情報セットをリアルタイムで生成する必要がある。300 局の基準局を使う場合、全推定パラメータ数は約 11300 に及び単純な実装では過大な計算機資源が必要になり実用的ではない。従って計算資源低減のため以下のような工夫を行う。

- (1) 最初に二周波観測データの電離層フリー線形結合により衛星軌道誤差・時計誤差、対流圏遅延を推定する。利用する局は全基準点のサブセットとする。
- (2) (1) を固定して全基準局間基線毎の整数バイアス、電離層遅延差、対流圏遅延差を推定する。推定した整数バイアスを解き各推定精度を改良する。
- (3) (2) で得られた解を利用し(1) を解き直すことに

より最終衛星軌道誤差、時計誤差が得られる。

(4) (2) で得られた全基線毎の推定値を統合し各基準局毎の電離層遅延、対流圏遅延、搬送波位相バイアス(衛星初期位相)、コードバイアスを推定する。

以上に示す分割フィルタにより現実的な計算機資源で補正情報を生成することが可能となる。処理方式の詳細および必要な計算機資源については今後プロトタイプ実装を行い評価していく必要がある。

6. まとめ

以上で検討した広域型ネットワーク RTK システムは QZSS LEX 信号を利用してセンチメートル級の高精度測位補強を行うシステムである。日本全国の広い範囲で連続的な利用が可能になることから、特に移動体利用者の精密測位への応用が期待される。QZSS の高仰角軌道の利点を使って山間地等、従来はリアルタイムでの精密測位が困難だった地域での利用も有効であろう。ただし本システムの実現にあたっては技術開発要素が多く、今後より詳細な検討・評価を進めて行く必要がある。

謝辞

本研究は財団法人衛星測位利用推進センター (SPAC) との共同研究「準天頂衛星の LEX 信号利用に関する信号内容の最適化に関する調査研究」に基づき実施したものである。

参考文献

- [1] 高須, RTK-GPS 及びネットワーク型 RTK-GPS 測位技術, GPS/GNSS シンポジウム 2007
- [2] 小暮他, QZSS の開発状況, GPS/GNSS シンポジウム 2007
- [3] 真鍋, 運輸多目的衛星用航法補強システム(MSAS)の供用開始, GPS/GNSS シンポジウム 2007
- [4] K.Dixon, StarFire (TM): A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning, ION GNSS 2006, Fort Worth, Texas, U.S., September 26-29, 2006
- [5] 宇宙航空研究開発機構, 準天頂衛星システムユーザインタフェース仕様書 (IS-QZSS) 1.0 版, 2008 年 6 月 17 日
- [6] G.Wübbena, M.Schmitz, A.Bagge, PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks, ION GNSS 2005, Long Beach, California, U.S., September 13-16, 2005
- [7] G.Wübbena, RTCM State Space Working Group - Mission Statements, RTCM Paper, April 2007