

東京湾仮想 RTK 基準局ネットワーク

安田 明生 (東京商船大学)

河口 星也, 石井 真、イワン・ペトロフスキー、鳥本 秀幸 (DX アンテナ)

藤井 健二郎、恵比根 一秀 (日立製作所)

藤本 一夫 (テレビ朝日)

増田 稔 (東亜建設工業)

1. はじめに

ここ数年、人工衛星を利用した測位システムである GPS の利用が様々な分野において浸透しつつある。この流れに伴い GPS というシステムそのものも発展を遂げつつあり、先日 (2000 年 5 月 2 日) 実現した SA 解除をはじめとして、米国政府は今後 GPS の近代化計画として L2 帯への民間用 C/A コードの追加、また第 3 の周波数の導入を計画している。これに歩調をあわせるように欧州では独自の衛星測位システム Galileo の構築計画が着々と進行しつつあり、またロシアの GLONASS も 2005 年以降に予定されている周波数移行をメドに、今後衛星数が徐々に増加していくことが期待される。

これら衛星測位システムの整備が着々と進められていく一方で、DGPS (Differential GPS) や RTK-GPS (Real Time Kinematic GPS) と呼ばれるより高精度な GPS 測位技術を利用するためには、補正情報を配信するための地上系システムの構築が必要となってくる。特に実時間で数 cm 精度の位置決定を可能とする RTK-GPS は現在様々な分野において実用化が期待されているが、DGPS のように国内全域をカバーするインフラはこれまでのところ整備されていない。そのため通常は利用者が独自に基準局を設置するとともに補正情報を送信するための通信手段を確保する必要があり、利用面での不便さからいまだ幅広い分野において普及しているとは言い難い。また、技術的な観点から見た場合に RTK-GPS 本来の測位精度 (FIX 解) を維持できるエリアが基準局から半径 10 ~ 15km 程度と限定されるため、“狭いエリアで高精度”が要求されるアプリケーションにおいて有効ではあるが、例えば移動体向けの“広いエリアで高精度”を要求されるアプリケーションには不向きであるという側面を持っており、RTK-GPS の実用化を制限する大きな要因の一つとなっている。数 cm 精度の高精度測位を手軽に実現するためには、地上系インフラの整備とともに、より広域で RTK-GPS を利用するための新たな手法の開発が必要となる。

そこで本稿では衛星測位技術の現状を踏まえた上で、

これらの問題点を解決するための要素技術の 1 つとして、仮想 RTK 基準局方式と呼ばれる新たな RTK-GPS 技術を紹介し、東京商船大学との産学協同プロジェクトである「海事交通共同研究センター」の一環として設置した東京湾仮想 RTK 基準局ネットワークの概要について説明する。この仮想 RTK 基準局方式は複数の基準局をネットワーク化することでエリア内の相対的な大気遅延誤差、衛星軌道誤差を補正するとともに、移動局の近傍に仮想的な基準局を作成し、広域における RTK-GPS を可能とする。また、この仮想 RTK 基準局方式を最大限に活用するための補正情報配信システムとして、テレビ放送における音声の副搬送波 (ASC: Audio Subcarrier Channel) を利用したデータ放送技術を紹介し、我々の構築した実験システムとともに今後の衛星測位技術の新たな可能性を提案する。

2. 衛星測位技術の現状

2.1 単独測位

GPS は軍事および民生用という 2 つの枠組みに基づいてシステムを構築されているが、民生用として一般に利用されているのは SPS (Standard Positioning Service) と呼ばれるサービスである。GPS 衛星から送信される L1 帯および L2 帯の 2 種類の測位用信号のうち基本的に L1 帯のみを利用し、受信機単体で測位を行うため単独測位とも呼ばれる。最近まで SA (Selective Availability) と呼ばれる精度劣化政策に基づき衛星の軌道情報および L1 帯 C/A コードのタイミングに意図的な誤差が与えられており、測位精度は水平方向で 100m (95%) に抑えられていたが、本年 5 月 2 日 SA が全面的に解除となり、従来と比較して現在では 10 倍以上の測位精度の向上が見られている。なお、昨年 9 月に米国ソルトレイクシティで開催された CGSIC (Civil GPS Service Interface Committee) 会議において、SA 解除後の SPS の測位精度として、水平方向で 5m (95%) という規定が盛り込まれる予定であることが発表されている。

2. 2 相対測位

より高精度な測位を実現するためにあらかじめ正確な座標のわかっている基準局を利用して、未知点である移動局の相対的な位置を決定する測位方式を相対測位と呼ぶ。相対測位は衛星から受信機までの擬似距離を利用して測位を行う DGPS と、搬送波位相の位相差を利用して測位を行う RTK-GPS とに分類される。DGPS では基準局において計算された各衛星の擬似距離測定誤差を、RTK-GPS においては各衛星の擬似距離および搬送波位相観測値を補正情報という形式で移動局に対して実時間で伝送し、移動局側で実際の測位計算を行う。測位精度は受信機や環境によって左右されるが DGPS で概ね 1m 程度、RTK-GPS においては搬送波位相のアンビギュイティ (ambiguity : 波数不確定) が整数値で決定された場合に得られる FIX 解で数 cm 程度である。

GPS 衛星から到達する電波は、電離層および対流圏を通過する際に伝播遅延を生じ、受信機において観測誤差 (大気遅延誤差) を生じる。伝播遅延量は上空の大気の状態に応じて変化するが、大気状態の空間的な不均質の影響により基準局と移動局間の距離が大きくなるに伴い一般的に差が大きくなる。つまり基線長が短ければ伝播遅延量はほぼ同一であるため大気遅延誤差は軌道誤差とともに二重位相計算時にほぼ完全に相殺処理されるが、基線長が長くなると相殺されずに誤差として残るため、測位精度の劣化やアンビギュイティの決定ミスを生じる可能性が高くなる。特に電離層の影響は季節や時間帯、また太陽の周期的な黒点活動に大きく左右され、基線長が概ね 10~15km 以上になると、通常の RTK-GPS では FIX 解を得ることが困難になる。また、こうした実際の環境に適応するために、一般的な RTK-GPS 受信機は基線長が長くなるとともに計算アルゴリズムを最適化させており、例えば基線長が長くなるとともに L1+L2 の線形結合であるナローレーンではなく L1-L2 の線形結合であるワイドレーンを用いて FIX 解を求めたり、あるいはアンビギュイティを整数化しない FLOAT 解を採用する。すなわち RTK-GPS を利用して数 cm 精度の測位を実現するためには、“基準局からの距離”が事実上の制約条件となり、広域においてシームレスな RTK-GPS を実現するためには、単純に考えても最低 20km 間隔で基準局を設置していく必要がある。

3. 仮想 RTK 基準局方式の概念

仮想 RTK 基準局方式は RTK-GPS における距離的な限界を、その名の通り、移動局の近傍に“仮想的な”基準局を作成することにより解決する新しい手法である。仮想 RTK 基準局を作成するにあたっては、複数の基準局における観測値をもとにエリア内における相対誤差を補正することからネットワーク RTK とも呼ばれている。

以下にこの手法の概念を述べる。

3. 1 相対誤差の補正

あるエリア内における大気の状態は空間的に不均質であるため、電離層・対流圏遅延誤差も電波を受信する場所に応じて相対的に変化する。この場合、遅延誤差の絶対量は問題ではなく、任意の 2 点間における誤差の差分 (相対誤差) が問題となってくる。これは軌道誤差についても同様であり、従来の RTK-GPS においては基準局が 1 局であったため、基準局から離れるとともに移動局における相対誤差が大きくなり、FIX 解を得ることが困難であった。

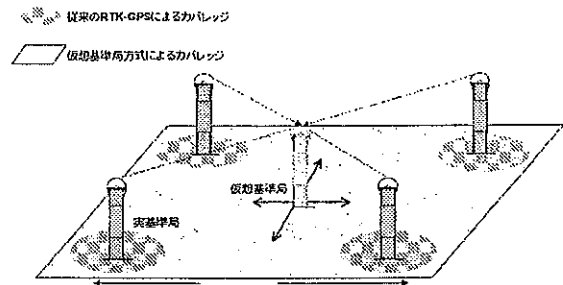


図1 仮想 RTK 基準局方式によるカバレッジ

一方、複数の基準局において観測されたデータをリアルタイムで処理することにより、エリア内の相対誤差をモデル化し、補正することが可能である。まず各基準局間の二重位相のアンビギュイティを決定する。次に実際の搬送波位相観測値と、衛星軌道および観測点座標から計算された各衛星までの距離との残差を求める。この残差をもとに最小二乗コロケーション法を用いて、エリア内における擬似距離および搬送波位相の相対誤差を推定する (Lachapelle et al., 2000)。

この手法を用いることにより約 30~100km 程度の間隔で基準局を配置することが可能となるが、これは従来の RTK-GPS と比較しておよそ 1.5~3 倍程度のカバレッジを実現したことになる。図1にその概念図を示す。

3. 2 仮想 RTK 基準局の作成

一般的な RTK-GPS 受信機は基準局からの距離に応じて測位計算アルゴリズムを変化させている。そのため、たとえ相対誤差を補正しその影響を取り除いたとしても、実際の測位計算に使用する基準局との距離が大きく離れていれば受信機はその計算アルゴリズムに従い、FIX 解を求めない方向で計算を行う。つまり複数の基準局における観測値をもとに相対誤差を取り除いたにもかかわらず、受信機は相対誤差があるものとして計算を行おうとするため、最適な計算アルゴリズムが適用されない結果となる。

これを回避するために、仮想 RTK 基準局という概念を利用する。移動局の近傍に仮想的な基準局を作成し、実際の測位計算は“短距離の RTK-GPS”としてあくまで仮想 RTK 基準局と移動局間で行う。

以上述べたように、従来の基地局 1 局を利用する RTK-GPS に対して、複数の基準局をネットワーク化して利用することにより、少ない基準局数でより広いサービスエリアを実現するとともに、システムとしての信頼性の向上、そしてより高精度な測位が可能となる。なお、この手法は 1996 年からカルガリー大学において研究されてきたもので、MultiRef と呼ばれている (Lachapelle et al., 2000)。

4. テレビ放送 (ASC) を用いた補正情報配信システム

一般的に RTK-GPS においては、利用者が独自に基準局を設置するとともに、基準局からの補正データ伝送手段を確保する必要がある。この場合無免許で利用できる特定小電力無線を用いたり、また携帯電話、PHS 等を用いるケースがほとんどであるが、前者は有効範囲が数 km 程度に限定されること、また後者は時間に応じて通信費を課金されることから、連続的に運用するには必ずしも有効な手段ではない。

そこで補正情報配信のための伝送手段として、既に全国にわたって普及しているテレビ放送を利用する試みがテレビ朝日により数年前より実施されている。主要都市でのテレビ放送はいずれも大電力で放送されているため電波の到達距離が大きく、利用者はこの音声信号の副搬送波 (Audio Subcarrier Channel: ASC) を利用したデータ放送を受信することにより、広域にわたって安定して RTK-GPS 補正情報を受信することが可能となる。表 1 に ASC の技術緒元を示す。

実行伝送速度	9.6kbps (1 波当たり)
伝送速度	16.000kbps
副搬送波周波数	4.5fh: 70.804kHz, 7.5fh: 118.007kHz
主搬送の周波数偏移	4.5fh: ±3KHz, 7.5fh: ±6KHz
副送波の変調方式	DQPSK

表 1 ASC の技術緒元

仮想 RTK 基準局方式により原理的に長距離の RTK-GPS が実現したとしても、そのメリットを享受するためには広域のユーザーに対して補正データを提供する伝送手段を確立する必要があるため、この ASC を用いた放送システムは非常に有効である。

テレビ朝日の東京タワー送信所は、海拔高約 300m、音声出力電力 12.5KW、映像出力 50KW、TV10ch である。八木アンテナで受信した時の受信エリアは図 2 の黒

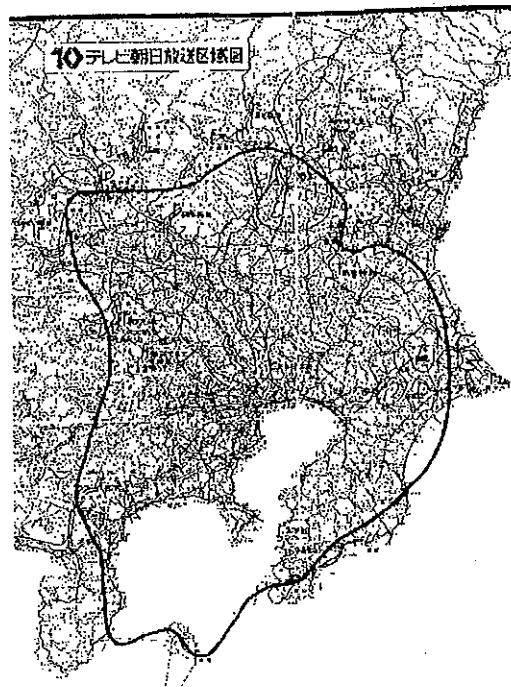


図 2 テレビ朝日受信エリア

枠の通りである。北は栃木県宇都宮市 100km、東は千葉県佐原市 55km、南は大島 70km、西は埼玉県秩父市 70km 付近まで受信が可能である。一方手持ちの携帯アンテナで受信すると、東京タワーを中心に約 30~50km が受信限界になる。特に RTK の FIX 解を維持するためには安定した受信レベルが必要となるため、場合によっては信号増幅用のブースターを使用する必要がある。

アナログ地上波テレビのデータ放送には画像多重と音声多重の 2 種類がある。画像の隙間を利用したデータ放送は ADAMS、BITCAST、IT ビジョンで実用化されている。

しかし車の中でテレビを見ると画像が乱れるので、これらの方式では移動時における受信が難しい。しかし ASC は音声の隙間に乗せるデジタル信号なので、例えば時速 200km の新幹線においても受信が可能である。すなわち RTK サービスのみならず車など移動体向けのサービスも実現可能である。

また、信号の 1 フレームは 16 ビットのフレーム同期信号 + 288 ビット × 32 パケットとなっているが、1 フレームの伝送時間が 0.577 秒と非常に短いため、少ない遅延時間が求められる RTK-GPS において有効である。

5. 仮想 RTK 基準局方式を用いた東京湾ネットワーク

2000年5月より、テレビ朝日、日立製作所、WIDE プロジェクト及びカルガリー大学の技術協力のもと仮想 RTK 基準局方式の検証を目的とした実験システムを構築し、システム検証を行っている。この実験システムは

基準局、制御局、送信局、そして移動局の4つのシステムから構成されており、それぞれ今回の仮想 RTK 基準局方式を実現する上で不可欠な要素となっている。今回の実験システムの構成を図3に示す。またシステム全体のデータの流れを図4に示す。

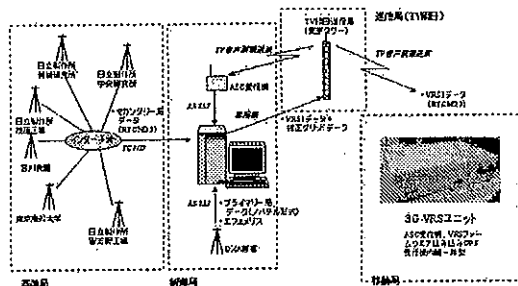


図3 実験システムの構成

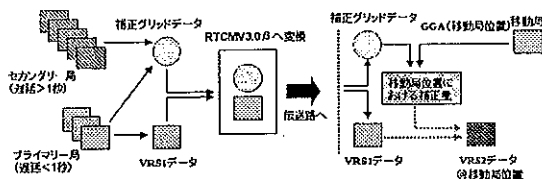


図4 実験システムにおけるデータの流れ

5.1 基準局

本システムでは、基準局間距離が最大で100km程度に達する合計6局(図5)の基準局を利用している。

各基準局には2周波GPS受信機であるノバテル社RT2受信機およびマルチパス除去機能を強化したGPS600アンテナが設置され、1秒間隔でRTCM V2.2フォーマットにおけるタイプ3(基準局座標値)、タイプ18(搬送波位相測定値)、およびタイプ19(擬似距離測定値)の3種類のメッセージを出力している。これらのメッセージは通常のRTK-GPSにおいて基準局から送信するいわゆる“補正情報”と全く同じデータである。出力されたデータはRS-232C経由で基準局サーバ(グローバルIPアドレスを割り当てられたFreeBSDマシン)に入力され、今回開発されたプロトコルに基づきインターネット用のデータ形式に変換された上で、次節で述べる制御局サーバに対して送信される。なお、制御局サーバや通信回線にアクシデント等があり通信が一旦切断された場合、基準局サーバは5分間ごとに制御局サーバへの接続をリトライするように設定されている。

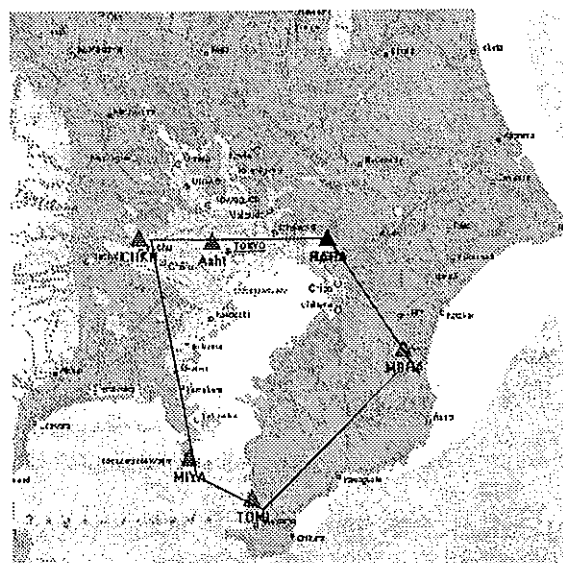


図5 基準局の配置

特にコスト面と拡張性(汎用性)という観点から考えた場合、インターネットは基準局—制御局間の通信手段として非常に有効である。仮想RTK基準局方式においては、基準局と制御局間が常時接続されている必要があるが、通常の公衆回線を利用した場合、そのコストは非常に大きなものになる。また、専用線を利用する場合はその通信距離に応じてコストが左右されるため、より広域を対象としたシステムを実現しようとすればそれだけコストがかさむ結果となる。今回の実験システムにおいてはフレッツISDNを利用しインターネットに常時接続している。この他にもLAN接続方式も可能であり、近くのインターネットへのアクセスポイントを利用することで回線使用料を削減することもできる。

また、拡張性という観点から言えば、インターネットを利用することで、例えば複数の基準局サーバに対して同時に基準局データを送信することも可能になる。これは将来的に制御局を追加した場合に基準局データの送信先を複数指定することで容易に実現が可能である。一方で将来的に基準局を追加した場合データの受け側である制御局においては、インターネットへの接続さえ確立していれば特に物理的に機器を追加する必要がないことを意味する。

さらに基準局サーバがIPアドレスを持っていることで、基準局の制御を世界中どこからでも容易に行うことが可能になる。実際に今回のシステムにおいては基準局の設定変更を複数の異なる場所から行っている。このインターネットを用いた基準局データ収集システムはWIDEプロジェクト、慶応大学SFC研究所インターネット自動車コンソーシアム、および奈良先端科学技術大学院大学の技術協力により構築されたものである。なお、

移動体に対する RTK-GPS および DGPS 補正情報の配信手段としてインターネットを利用する試みも既に始まっており、その有効性が実証されている(Hada et al., 2000)。

5.2 制御局

制御局には基準局と同様にグローバル IP アドレスを割り当てられたサーバが設置されており、ソケットインターフェイスにより各基準局データをインターネット経由でリアルタイムに受信する。受信した各基準局のデータは本システムの中核をなす MultiRef ソフトウェアに受け渡され、エリア内の相対的な電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差がモデル化される。

基準局はその役割から 2 種類に分類される。ひとつはプライマリー局と呼ばれる基準局で、データの伝送遅延が確実に 1 秒以下であることを前提としている。今回は制御局にも基準局受信機を設置しており、このデータに関しては RS-232C 経由で直接制御局サーバに取り込むことで伝送遅延を最小限に抑えている。このプライマリー局データは最終的に移動局側において作成される仮想 RTK 基準局データ“VRS2”の原型となるデータであり、“VRS1”と呼ばれている。一方で、残りの基準局はセカンダリー局と呼ばれ、電離層・対流圏遅延誤差および衛星軌道誤差モデル(補正グリッドデータ)を作成するために利用される。これらの誤差要因は時間的変動がそれほど急激ではないため、現実的には伝送遅延が 30 秒程度あったとしても最終的な測位精度にはほとんど影響を及ぼさないことが確認されている(Townsend et al., 1999)。今回セカンダリー局との通信にインターネットを利用することで、時間帯等により多少伝送時間を要する場合でも、結果的には何ら問題は生じておらず、インターネットの有効性が証明されている。

なお、制御局において作成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは専用線により次の送信局部に伝送される。

5.3 送信局

今回のシステムにおいては移動局への補正情報伝送手段として前述のテレビ朝日により開発された特許技術である ASC を利用している。制御局において生成された VRS1 データおよび補正グリッドデータは、専用線によりテレビ朝日の放送施設に伝送され、東京タワーから音声信号の副搬送波に乗せて放送されることとなり、今回のシステムが対象とするエリア全体をカバーする。また、現状のシステムにおいてグリッドデータを含む合計のデータ量が毎秒 3000~4000 ビット程度に抑えられており ASC の伝送速度(9600bps)に対してまだ余裕があるため、将来的には GLONASS、Galileo 等他の衛星測位システムのデータを同時に放送することも可能である。

5.4 移動局

移動局には、上記 ASC に対応した受信機、最終的な仮想 RTK 基準局作成計算のためのソフトウェアおよび RTK-GPS 受信機(RT-2)をひとつのユニットに内蔵した。GPS 受信機はまず受信地点における単独測位位置をソフトウェアに対して出力し、ソフトウェア側では受信した補正グリッドデータから、この座標値における補正量を改めて補間計算する。

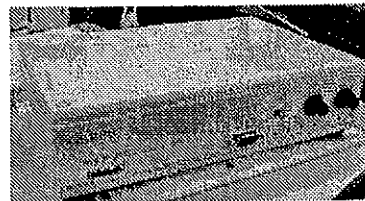


図6 VRS 対応 GPS 受信機ユニット 3G-VRS

一方 VRS1 データをもとにこの座標値における仮想的な基準局データが計算され、求められた補正量を加味することにより最終的な仮想 RTK 基準局データである VRS2 データを作成する。このデータは通常の RTK-GPS において利用されている RTCM V2.2 フォーマットのタイプ 3、18、および 19 メッセージとして移動局受信機に入力され、受信機内において通常の RTK-GPS 計算が行われることになる。なお、最終的に RTCM V2.2 フォーマットを用いるため、現在市販されているほとんどの受信機はそのまま利用可能である。

今回、(株)日立製作所で試作した 3G-VRS ユニットの、移動側の VRS 計算ソフトを GPS 受信機のファームウェアとして搭載させた。現在 RTCM 委員会に対して次の V3.0 フォーマットにおいて正式にネットワーク RTK メッセージをサポートするよう標準化の提案を行っている(Townsend et al., 2000)。このような日本からの標準化の働きかけは、世界一の GPS ユーザー大国としても重要と考える。

5.5 これまでの実験結果

東京湾ネットワークは、現在構築の最終段階にあり、完成し次第長期に渡って実用化を目指した各種試験を実施する予定である。このシステムの前身として 2000 年に構築した同様のテストサイトでの実験結果を参考として以下紹介する。これまでに得られた実験結果の一例を図 7 および図 8 に示す。千葉県習志野市内に移動局を設置し、静止状態で約 40 分間のデータを取得したものである。最も近い基準局までの距離は約 30km である。図 7 は水平成分および高さ成分の時系列を示している。ほぼ安定して $\pm 2\text{cm}$ 以内の精度におさまっていることがわかる。

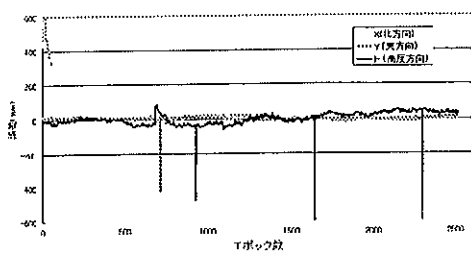


図7 各座標成分の時系列変化

また図7は水平成分をプロットしたものであるが、2.4cm (2drms) という結果を示している。従来のRTK-GPSにおいてはFIX解を得ることが不可能な距離において、RTK-GPSと同等の精度を実現していることから、仮想RTK基準局方式の有効性を証明していると言える。

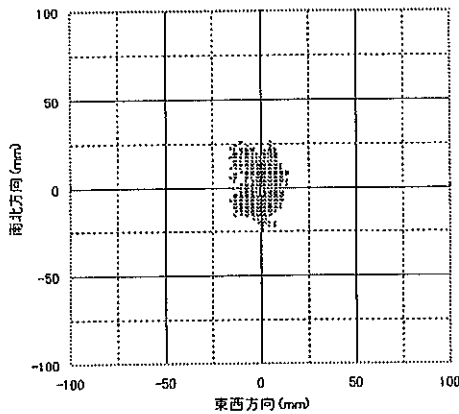


図8 水平成分のばらつき

6. 東京湾仮想RTK基準局ネットワークの位置付け

これまでに述べてきたように、仮想RTK基準局方式は従来事実上不可能であった広域におけるRTK-GPSを実現する。またテレビ放送を用いることにより広い地域の無数のユーザに対して同時にこのサービスを提供することが可能となる。従って大きな利用用途が生まれ、新しい測位インフラとして貢献度は高いといえる。しかし、具体的な導入方法や利用効果について、現段階ではその実用性や効果など明確になっていない。東京湾という場所は、海事交通の要所であり、かつ、その湾岸は、あらゆる産業基盤が集結している。また、海上というGPSにとっては、上空のGPS衛星の信号を妨害する障害物も少なく、今後期待される広域の高精度測位インフラの実用化を検証する上で最も有効な立地のひとつといえる。国土交通省国土地理院でも全国に約1000点展開されておりGPS電子基準点をリアルタイム化の改修を行い、今回の仮想RTK基準局ネットワークでもデータ利用できるように計画も進んでいる。しかし、ここで問題なのは、

こういった広域高精度測位インフラの具体的な利用価値や効果については、まだ明らかになっていないのが実情である。我々は、海事交通共同研究センター内に「最先端衛星測位研究センター(仮)」を設置し、その活動の大きな柱として今回構築する東京湾仮想RTK基準局ネットワークをベースにして、具体的なシステム構築を実際に行う予定である。例えば、リアルタイムに変化をDB化するリアルタイムGISデータベースセンタ構想、大規模工事やふくそうする東京湾海事交通の安全・効率化を実現する海上移動体動態監視システム構想、大型船離着岸支援システム構想、コンテナヤードにおけるコンテナ管理をIT化するシステムなど様々な構想を順次着手する予定である。当センターは、衛星測位周辺の国内外の研究者の参画を呼びかけ、研究成果のビジネス化をサポートする企業も積極参加し、日本の衛星測位における最先端の研究センターとして機能させていくことが重要と考えている。図8は国内全域をカバーするRTK-GPSサービスを構築すると仮定した場合のブロック概念図である。

6. まとめ

衛星測位技術の新たな流れとして、本稿ではRTK-GPSの新たな概念である仮想RTK基準局方式を説明し、また実際に運用されている実験システムを紹介した。今後はこの仮想RTK基準局の技術とともにASC、インターネット、スードライト等の要素技術を組合せた高精度位置インフラ構築の実現に向けて、さらなる実験および検証を行っていく予定である。

〔文 献〕

- 1) Hada, H., H. Sunahara, K. Uehara, J. Murai, I. Petrovski, H. Torimoto and S. Kawaguchi: DGPS and RTK Positioning Using the Internet, GPS Solutions Vol.4, N1, 2000
- 2) Lachapelle, G., P. Alves, L. P. Fortes, M. E. Cannon: DGPS RTK Positioning Using a Reference Network, Proceeding of ION GPS 2000, in publishing, Salt Lake City, USA, September, 2000
- 3) Townsend, B., G. Lachapelle, L. P. Fortes, T. E. Melgard, T. Norbech, and C. J. Raquet: New Concepts for a Carrier Phase Based GPS Positioning Using a National Reference Station Network, Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, USA, January 1999
- 4) Townsend, B., K. V. Dierendonck, J. Neumann, I. Petrovski, S. Kawaguchi, and H. Torimoto: A Proposal for Standardized Network RTK Messages, Proceedings of ION GPS 2000, in publishing, Salt Lake City, USA, September, 2000