

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-175134

(P2009-175134A)

(43) 公開日 平成21年8月6日(2009.8.6)

(51) Int.Cl.		F I			テーマコード (参考)
<b>G O 1 S</b> 5/14 (2006.01)		G O 1 S	5/14	5 2 5	2 F 1 2 9
<b>G O 1 C</b> 21/00 (2006.01)		G O 1 C	21/00	D	5 H 1 8 0
<b>G O 8 G</b> 5/00 (2006.01)		G O 8 G	5/00	A	5 J O 6 2

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L 外国語出願 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願2008-312173 (P2008-312173)	(71) 出願人	500575824
(22) 出願日	平成20年12月8日 (2008.12.8)		ハネウェル・インターナショナル・インコーポレーテッド
(31) 優先権主張番号	61/012, 303		アメリカ合衆国ニュージャージー州07962-2245, モーリスタウン, コロンビア・ロード 101, ピー・オー・ボックス 2245
(32) 優先日	平成19年12月7日 (2007.12.7)	(74) 代理人	100140109
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 小野 新次郎
(31) 優先権主張番号	12/102, 527	(74) 代理人	100089705
(32) 優先日	平成20年4月14日 (2008.4.14)		弁理士 社本 一夫
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100075270
			弁理士 小林 泰
		(74) 代理人	100080137
			弁理士 千葉 昭男

最終頁に続く

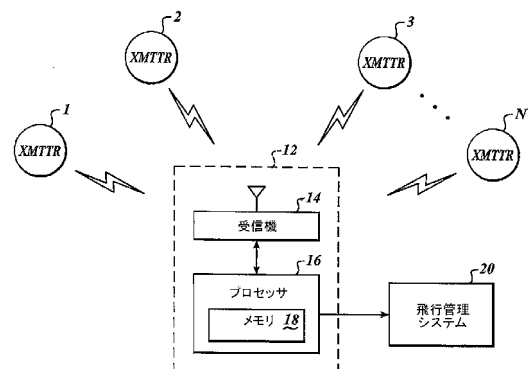
(54) 【発明の名称】 精度不良を検出する装置を備えるナビゲーションシステム

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】位置解の精度不良を検出し、保護レベルを精度よく算出する。

【解決手段】複数の送信機から複数の信号を受信するように動作することができる受信機14を有する車両用のナビゲーションシステム12は、プロセッサ16と、メモリデバイス18とを備える。メモリデバイス18は、機械読取り可能命令を格納しており、この命令はプロセッサ16によって実行されると、プロセッサ16が、複数の信号から導出される擬似距離測定値に対応する1組の誤差推定値を求めること、電離層遅延データを用いて、主航行解のための誤差共分散行列を求めること、及びパリティ空間技法を用いて、誤差共分散行列に基づいて、少なくとも1つの保護レベル値を求めることを可能にする。

【選択図】図1



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

複数の送信機から複数の信号を受信するように動作することができる受信機（１４）を有する車両用のナビゲーションシステム（１２）であって、該ナビゲーションシステム（１２）は、

プロセッサ（１６）と、

機械読取り可能命令を格納しているメモリデバイス（１８）と、

を備え、前記命令は、前記プロセッサ（１６）によって実行されると、該プロセッサ（１６）が、

前記複数の信号から導出される擬似距離測定値に対応する１組の誤差推定値を求めること、 10

と、電離層遅延データを用いて、主航行解のための誤差共分散行列を求めること、及び

パリティ空間技法を用いて、前記誤差共分散行列に基づいて、少なくとも１つの保護レベル値を求めることを可能にする、複数の送信機から複数の信号を受信するように動作することができる受信機を有する車両用のナビゲーションシステム。

**【請求項 2】**

前記誤差共分散行列を求めることは、前記送信機のそれぞれに関連付けられる、空間的に相関がある電離層誤差を求めることを含む、請求項 1 に記載のシステム。

**【請求項 3】**

前記誤差共分散行列を求めることは、電離層の薄殻モデル上で複数の格子点を定義することを含む、請求項 2 に記載のシステム。 20

**【請求項 4】**

前記定義された格子点は、前記システム（１２）から大圏距離において、方位方向に等間隔に配置される、請求項 3 に記載のシステム。

**【請求項 5】**

前記大圏距離は 1500 km である、請求項 4 に記載のシステム。

**【請求項 6】**

前記誤差共分散行列を求めることは、前記格子点における正規化された電離層遅延のベクトルを定義することを含む、請求項 3 に記載のシステム。

**【請求項 7】**

前記少なくとも１つの保護レベル値は、水平保護レベル値を含む、請求項 1 に記載のシステム。 30

**【請求項 8】**

前記少なくとも１つの保護レベル値は、垂直保護レベル値を含む、請求項 1 に記載のシステム。

**【請求項 9】**

前記少なくとも１つの保護レベル値は、水平除外レベル値を含む、請求項 1 に記載のシステム。

**【請求項 10】**

コンピュータ読取り可能媒体（１８）であって、該コンピュータ読取り可能媒体は、 40

複数の信号から導出される擬似距離測定値に対応する１組の誤差推定値を求めること、

電離層遅延データを用いて、主航行解のための誤差共分散行列を求めること、

パリティ空間技法を用いて、前記誤差共分散行列に基づいて、少なくとも１つの保護レベル値を求めること、及び

前記少なくとも１つの保護レベル値を表示することを含むステップを実行するためのコンピュータ実行可能命令を有する、コンピュータ読取り可能媒体。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、精度不良を検出する装置を備えるナビゲーションシステムに関する。 50

## [ 関連出願の相互参照 ]

本出願は、2007年12月7日に出版された「RAIM WITH SPATIALLY CORRELATED IONOSPHERIC ERRORS」と題する米国仮特許出願第61/012,303号からの優先権を主張し、当該仮特許出願は、本明細書において、その全体が述べられるものとして、参照により組み込まれる。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来のRAIMアルゴリズムは、重み付けされる最小二乗解か、又は重み付けされない最小二乗解のいずれかに基づくことができ、その場合に、各衛星の擬似距離(pseudo-range)測定値の誤差は、他の衛星の擬似距離測定値の誤差とは無関係である。

10

## 【0003】

しかしながら、各衛星の擬似距離内の電離層誤差(それは、支配的な誤差源である可能性が高い)は、実際には、他の衛星のそれぞれの電離層誤差と大きく相関する。この相関を無視することによって、水平方向の位置誤差を制限する水平保護限界(HPL)の計算値は、必要とされる値よりもはるかに大きくなる。結果として、低い航法性能要件(Required Navigation Performance、RNP)の手法をGPSが利用できなくなるという問題が生じる。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0004】

20

【特許文献1】米国特許第5,760,737号明細書

【特許文献2】米国特許第6,639,549号明細書

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0005】

本発明は、上述の問題を解決することを目的とする。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0006】

本発明の一実施の形態では、複数の送信機からの複数の信号を受信するように動作することができる受信機を有する、車両のためのナビゲーションシステムが、プロセッサ及びメモリデバイスを備える。このメモリデバイスは、機械読取り可能命令を格納しており、この命令は、プロセッサによって実行されると、プロセッサが、複数の信号から導出される擬似距離測定値に対応する1組の誤差推定値を求めること、電離層遅延データを用いて、主航行解のための誤差共分散行列を求めること、及びパリティ空間技法を用いて、誤差共分散行列に基づいて、少なくとも1つの保護レベル値を求めることを可能にする。

30

## 【0007】

本発明の好ましい実施形態及び代替的な実施形態が、以下の図面を参照しながら、以下に詳細に説明される。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0008】

40

【図1】本発明の実施形態を組み込むナビゲーションシステムを示す図である。

【図2】本発明の一実施形態による過程を示す図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0009】

図1は、本発明の一実施形態の教示を組み込む無線ナビゲーションシステムを示す。このシステムは、いくつかの送信機1~Nと、ユーザセット12とを含む。好ましい実施形態では、送信機1~Nは、衛星送信機のNAVSTAR GPSコンステレーションのサブセットであり、各送信機がユーザセット12のアンテナから視認可能である。送信機1~Nは、ユーザセット12に対して個々の送信機位置及び信号伝送時刻を指示するN個の個々の信号を報知(broadcast)する。

50

## 【 0 0 1 0 】

ユーザセット 1 2 は、航空機（図示せず）に取り付けられ、受信機 1 4 と、プロセッサ 1 6 と、プロセッサメモリ 1 8 のようなメモリデバイスとを備える。受信機 1 4 は、NAVSTAR GPS 互換であることが好ましく、信号を受信し、位置及び時刻データを抽出し、プロセッサ 1 6 に擬似距離測定値を与える。擬似距離測定値から、プロセッサ 1 6 は、ユーザセット 1 2 のための位置解を導出する。衛星は、1 9 8 4 年の世界測地系（WGS - 8 4）座標、デカルト地球中心地球固定座標系において、自身の位置を送信するが、好ましい実施形態は、北東座標面と水平であり、且つ地球に対して接している局所基準系 L において位置解を求める。しかしながら、座標系間で座標を変換する方法は十分に理解されているため、この座標系選択は重要ではない。

10

## 【 0 0 1 1 】

プロセッサ 1 6 はまた、擬似距離測定値を用いて、衛星送信機故障を検出すると共に、最悪誤差、すなわち保護限界を決定する。それらはいずれも、プロセッサ 1 6 によって、位置解と共に飛行管理システム 2 0 に出力される。飛行管理システム 2 0 は、保護限界と、特定の航空機飛行段階に対応する警報限界とを比較する。たとえば、非精密進入のような着陸前飛行段階中に、警報限界（又は許容半径誤差）は 0 . 3 海里であるが、負担の少ない大洋飛行段階中、警報限界は 2 海里 ~ 1 0 海里である（これらの限界に関するさらなる詳細については、参照により本明細書に援用される、RTCA 発行の DO - 2 0 8 を参照されたい）。保護限界が警報限界を超える場合には、飛行管理システム、又はその均等物が、航空機のコックピット内の航行用ディスプレイにインテグリティ不良を告知又は通知する。プロセッサはまた、何らかの衛星送信機故障を検出したか否かも通知する。

20

## 【 0 0 1 2 】

本発明の一実施形態は、各衛星対間の電離層誤差の相関を、それらの電離層ピアースポイント（pierce point）間の距離の関数としてモデル化する。ピアースポイントが近いほど、相関が大きくなる。各衛星の擬似距離測定値の二乗平均（RMS）不確定性（又は）が、DO - 2 2 9 D、Appendix J に定義される電離層分散モデルを用いて計算される。衛星毎に計算された相関係数及びを用いて、電離層測定誤差共分散行列が形成される。残りの誤差（衛星クロック及び天体暦、対流圏、マルチパス及び受信機の雑音）は、相関がないものと仮定される。したがって、これらの誤差源の場合の合成される測定誤差共分散行列は対角行列である。これらの 2 つの行列を加えて、全測定誤差共分散行列が形成される。この行列はその後、最小二乗解を求めるための重み行列を形成するために反転される。その後、障害検出及び除外を実行することができ、米国特許第 5 , 7 6 0 , 7 3 7 号及び第 6 , 6 3 9 , 5 4 9 号においてすでに記載されている解分離のモデルに基づいて、水平保護レベル（HPL）、垂直保護レベル（VPL）、水平除外レベル（HEL）及び垂直除外レベル（VEL）のような種々の保護レベルを計算することができ、これらの特許文献は、本明細書において、その全体が述べられるかのように、参照により援用される。

30

## 【 0 0 1 3 】

図 2 は、図 1 に示される無線ナビゲーションシステムにおいて実施することができる、本発明の一実施形態による過程 2 0 0 を示す。その過程 2 0 0 は、個別のブロックとして示される 1 組の演算又はステップとして示される。その過程 2 0 0 は、任意の適切なハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア、又はそれらの組み合わせで実施することができる。したがって、過程 2 0 0 は、通信媒体を介して、1 つの電子デバイスから第 2 の電子デバイスに転送することができるコンピュータ実行可能命令において実施することができる。その演算が説明される順序は、必ずしも制限として解釈されるべきではない。

40

## 【 0 0 1 4 】

図 2 を参照すると、ステップ 2 1 0 では、プロセッサ 1 6 は、擬似距離及び測定値に関する（誤差）値を計算する。

ステップ 2 2 0 では、プロセッサ 1 6 は測定値行列を求める。擬似距離残差の真のベクトルは、以下のように、増分位置 / 時間解ベクトル  $\times$ （位置線形化点からの距離）

50

に関連する。

【 0 0 1 5 】

【 数 1 】

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}} = \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} \quad (1)$$

【 0 0 1 6 】

式中、H は測定値行列であり、以下の式によって与えられる。

【 0 0 1 7 】

【 数 2 】

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -LOS_{1x} & -LOS_{1y} & -LOS_{1z} & 1 \\ -LOS_{2x} & -LOS_{2y} & -LOS_{2z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -LOS_{Nx} & -LOS_{Ny} & -LOS_{Nz} & 1 \end{bmatrix} \quad 10$$

【 0 0 1 8 】

ただし、以下のベクトルは、ユーザから衛星 i を指している見通し単位ベクトルである。

【 0 0 1 9 】

【 数 3 】

$$\begin{bmatrix} LOS_{ix} \\ LOS_{iy} \\ LOS_{iz} \end{bmatrix} \quad 20$$

【 0 0 2 0 】

また、以下の式は、真の位置 / クロックバイアス - 線形化点に等しい。

【 0 0 2 1 】

【 数 4 】

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} \quad 30$$

【 0 0 2 2 】

ステップ 2 3 0 では、プロセッサ 1 6 は、誤差共分散行列を計算する。測定された擬似距離残差のベクトル

【 0 0 2 3 】

【 数 5 】

$$\Delta \tilde{\mathbf{p}}$$

【 0 0 2 4 】

は、真の擬似距離残差ベクトル + 残留誤差のベクトル であり、それゆえ、以下のようになる。

【 0 0 2 5 】

【 数 6 】

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{\mathbf{p}} &= \mathbf{p} + \delta \mathbf{p} - \hat{\mathbf{p}} \\ &= \tilde{\mathbf{p}} - \hat{\mathbf{p}} \\ &= \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{p} \end{aligned} \quad (2)$$

【 0 0 2 6 】

プロセッサ 1 6 は、 $\mathbf{x}$  の更新後推定値を

【 0 0 2 7 】

【 数 7 】

$$\Delta \hat{\mathbf{x}}$$

【 0 0 2 8 】

と指定する。その際、プロセッサ 16 は、更新後測定残差のベクトルを以下のように定義することができる。

【 0 0 2 9 】

【 数 8 】

$$\xi = \Delta \tilde{p} - H \Delta \hat{x} \quad (3)$$

【 0 0 3 0 】

各更新後測定残差は、測定された擬似距離残差と、更新後推定値

【 0 0 3 1 】

【 数 9 】

$$\Delta \hat{x}$$

【 0 0 3 2 】

に基づいて予測される擬似距離残差との間の差である。

「重み付けされた最小二乗解」は、二乗された残差の重み付けされた和を最小にする

【 0 0 3 3 】

【 数 10 】

$$\Delta \hat{x}$$

【 0 0 3 4 】

の値を見つけることによって、プロセッサ 16 によって求められることができる。したがって、プロセッサ 16 は、以下の式を最小にすることができる。

【 0 0 3 5 】

【 数 11 】

$$\xi^T W \xi = (\Delta \tilde{p} - H \Delta \hat{x})^T W (\Delta \tilde{p} - H \Delta \hat{x}) \quad (4)$$

【 0 0 3 6 】

式中、Wは適切な重み行列である。一般的に選択される重み行列は、各擬似距離測定値の不確定性に基づいて残差を正規化する行列である。したがって、プロセッサ 16 は、無相関測定値を仮定して、以下の行列を生成する。

【 0 0 3 7 】

【 数 12 】

$$W = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1/\sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

【 0 0 3 8 】

これは、各擬似距離誤差が他と相関がないものと仮定して、擬似距離測定誤差共分散行列の逆行列を表す。

しかしながら、各擬似距離誤差の垂直電離層遅延成分は、他と大きく相関する。この相関がわかる場合には、プロセッサ 16 は、真の擬似距離測定誤差共分散行列 R を用いることによって、その知識を利用することができる。その際、重み行列は以下ようになる。

【 0 0 3 9 】

10

20

30

40

【数 1 3】

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & E[\delta\rho_1\delta\rho_2] & \cdots & E[\delta\rho_1\delta\rho_N] \\ E[\delta\rho_1\delta\rho_2] & \sigma_2^2 & \cdots & E[\delta\rho_2\delta\rho_N] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[\delta\rho_1\delta\rho_N] & E[\delta\rho_2\delta\rho_N] & \cdots & \sigma_N^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

【 0 0 4 0】

(4) を最小にする

10

【 0 0 4 1】

【数 1 4】

 $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ 

【 0 0 4 2】

の値は、導関数を取り、それが 0 に等しいものとして、

【 0 0 4 3】

【数 1 5】

 $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ 

【 0 0 4 4】

について解くことによって求められる。これによって、以下の式が生成される。

20

【 0 0 4 5】

【数 1 6】

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta\tilde{\mathbf{p}} \\ &= \mathbf{S} \Delta\tilde{\mathbf{p}} \end{aligned} \quad (7)$$

【 0 0 4 6】

ただし、プロセッサ 1 6 は、重み付けされた最小二乗解行列  $\mathbf{S}$  を以下のように定義している。

【 0 0 4 7】

【数 1 7】

30

$$\mathbf{S} = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \quad (8)$$

【 0 0 4 8】

高度補助

GPS 擬似距離測定値を拡大するために、プロセッサ 1 6 は気圧高度を用いることができる。気圧高度が用いられる場合には、測定値行列は、以下のように拡大される。

【 0 0 4 9】

【数 1 8】

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} -LOS_{1x} & -LOS_{1y} & -LOS_{1z} & 1 \\ -LOS_{2x} & -LOS_{2y} & -LOS_{2z} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -LOS_{Nx} & -LOS_{Ny} & -LOS_{Nz} & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

40

【 0 0 5 0】

この測定値行列は、 $x$  内の増分位置ベクトル（最初の 3 要素）が局所レベル座標において（ $z$  軸で下方に）与えられるものと仮定する。その際、見通し（line-of-sight、LOS）要素も、局所レベル座標内で表されなければならない。重み行列も以下のように拡

50

大される。

【 0 0 5 1 】

【 数 1 9 】

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & E[\delta\rho_1\delta\rho_2] & \cdots & E[\delta\rho_1\delta\rho_N] & 0 \\ E[\delta\rho_1\delta\rho_2] & \sigma_2^2 & \cdots & E[\delta\rho_2\delta\rho_N] & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ E[\delta\rho_1\delta\rho_N] & E[\delta\rho_2\delta\rho_N] & \cdots & \sigma_N^2 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \sigma_{baro}^2 \end{bmatrix}^{-1} \quad (10)$$

10

【 0 0 5 2 】

測定値共分散行列を計算する

測定誤差共分散行列を求めるために、多数の方法を用いることができる。カルマンフィルタを適用する場合、電離層遅延の時間的な挙動（時間相関）をモデル化することができる。衛星  $i$  のための空間的に相関がある電離層誤差は、以下のように、その衛星のための名目的なイオノ（iono）値によってスケージングされる、3つの独立して正規化された（ $= 1.0$ ）ガウスランダム誤差の重み付けされた和としてモデル化することができる。

【 0 0 5 3 】

20

【 数 2 0 】

$$\delta\rho_{iono\_i} = \sigma_{iono\_i} \mathbf{k}_{iono\_i}^T \mathbf{x}_{ref} \quad (11)$$

【 0 0 5 4 】

式中、 $\mathbf{x}_{ref}$  は、平均が 0 で、分散が 1 の独立ガウスランダム誤差の  $3 \times 1$  ベクトルである。重みベクトル

【 0 0 5 5 】

【 数 2 1 】

$$\mathbf{k}_{iono\_i}^T$$

30

【 0 0 5 6 】

は、ユーザから  $1500 \text{ km}$  の大圏距離において方位方向に等間隔に配置される、電離層の薄殻モデル（ $350 \text{ km}$  の高さにある）上の 3 つの格子点を最初に定義することによって、プロセッサ 16 によって求められる。その後、プロセッサ 16 は、これらの点において、正規化された遅延の  $3 \times 1$  ベクトル  $\mathbf{x}_{grid}$  を定義することができる。格子点  $i$  及び  $j$  における遅延は、以下の式に従って、それらの間の大圏距離に基づいて、互いに空間的に相関をなすことができる。

【 0 0 5 7 】

【 数 2 2 】

$$E[x_{grid\_i} x_{grid\_j}^T] = 1 - \left( 1 - e^{-d_{grid\_i, grid\_j} / d_{iono}} \right)^2 \quad (12)$$

40

【 0 0 5 8 】

式中、

$d_{grid\_i, grid\_j}$  = 格子点  $i$  と格子点  $j$  との間の大圏距離

$d_{iono}$  = 電離層遅延の相関距離 =  $4000 \text{ km}$

( 1 3

)

である。

【 0 0 5 9 】

その関係を用いて、プロセッサ 16 は、各格子点間の相関を記述する  $3 \times 3$  共分散行列  $\mathbf{P}_{grid}$  を形成することができる。

50

【 0 0 6 0 】

【 数 2 3 】

$$\mathbf{P}_{grid} = E[\mathbf{x}_{grid} \mathbf{x}_{grid}^T]$$

【 0 0 6 1 】

これらの格子点において存在する遅延過程が、基準独立ガウスランダム誤差の或る線形結合である場合には、それらの過程は、所望の空間的相関及び時間的相関を有する。プロセッサ 16 は、所望の線形結合が、以下のように、 $3 \times 3$  上三角マッピング行列  $\mathbf{U}_{grid}$  を用いることによって得られるものと仮定することができる。

【 0 0 6 2 】

【 数 2 4 】

$$\mathbf{x}_{grid} = \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref} \quad (14)$$

【 0 0 6 3 】

その際、グリッド共分散行列は以下のとおりである。

【 0 0 6 4 】

【 数 2 5 】

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{grid} &= E[\mathbf{x}_{grid} \mathbf{x}_{grid}^T] = \mathbf{U}_{grid} E[\mathbf{x}_{ref} \mathbf{x}_{ref}^T] \mathbf{U}_{grid}^T \\ &= \mathbf{U}_{grid} \mathbf{U}_{grid}^T \end{aligned} \quad (15)$$

【 0 0 6 5 】

それゆえ、マッピング行列  $\mathbf{U}_{grid}$  は、単に共分散行列  $\mathbf{P}_{grid}$  を因数分解することによって、プロセッサ 16 によって形成されることができる。3つの格子点の幾何学的配置は固定されているため、共分散行列  $\mathbf{P}_{grid}$  は一定であり、それゆえ、プロセッサ 16 によって予め計算されることができる。ここで、プロセッサ 16 は、3つの格子点遅延の線形結合を選択することができ、その線形結合は衛星  $i$  のピアースポイントにおける正規化された遅延を生成し、3つの格子点（それゆえ、おそらく、他の衛星それぞれ）との適切な空間的相関が以下のように達成されるようになる。

【 0 0 6 6 】

【 数 2 6 】

$$\delta \rho_{norm\_iono\_i} = \mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T \mathbf{x}_{grid} \quad (16)$$

【 0 0 6 7 】

式中、

$\mathbf{k}_{sat\_i\_grid}$  = 重み係数の 3 ベクトル

$norm\_iono\_i$  = 衛星ピアースポイントにおける正規化された遅延

である。

【 0 0 6 8 】

衛星擬似距離遅延は、以下の式に従って、第  $k$  の格子点における遅延と相関をなすことができる。

【 0 0 6 9 】

【 数 2 7 】

$$E[\delta \rho_{norm\_iono\_i} \mathbf{x}_{grid\_k}^T] = 1 - \left( 1 - e^{-d_{sat\_i\_grid\_k} / d_{iono}} \right)^2 \quad (17)$$

【 0 0 7 0 】

式中、

$d_{sat\_i\_grid\_k}$  = 衛星ピアースポイントと格子点との間の大圏距離

$d_{iono}$  = 名目的な電離層遅延の相関距離

( 1 8

)

である。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 1 】

1 × 3 共分散行列  $P_{sat\_i\_grid}$  は、衛星  $i$  と各格子点との間の相関を定義し、以下ようになる。

【 0 0 7 2 】

【 数 2 8 】

$$\begin{aligned} P_{sat\_i\_grid} &= E[\delta\rho_{norm\_i} \mathbf{x}_{grid}^T] = E[\mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T \mathbf{x}_{grid} \mathbf{x}_{grid}^T] \\ &= \mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T P_{grid} \end{aligned} \quad (19)$$

【 0 0 7 3 】

それゆえ、重みベクトル  $\mathbf{k}_{sat\_i\_grid}$  は、以下のように、プロセッサ 16 によって見つけられることができる。

10

【 0 0 7 4 】

【 数 2 9 】

$$\mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T = P_{sat\_i\_grid} P_{grid}^{-1} \quad (20)$$

【 0 0 7 5 】

(14) 及び (16) を組み合わせて、プロセッサ 16 は、以下のように、3つの独立基準遅延から直接、正規化された垂直遅延を得ることができる。

【 0 0 7 6 】

【 数 3 0 】

$$\begin{aligned} \delta\rho_{norm\_iono\_i} &= \mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref} \\ &= \mathbf{k}_{iono\_i}^T \mathbf{x}_{ref} \end{aligned} \quad (21)$$

20

【 0 0 7 7 】

それゆえ、重みベクトルは以下のとおりである。

【 0 0 7 8 】

【 数 3 1 】

$$\mathbf{k}_{iono\_i}^T = \mathbf{k}_{sat\_i\_grid}^T \mathbf{U}_{grid} \quad (22)$$

【 0 0 7 9 】

プロセッサ 16 は、以下のように、(21) から、N 個の正規化された擬似距離イオノ遅延のベクトルを形成することができる。

30

【 0 0 8 0 】

【 数 3 2 】

$$\begin{aligned} \delta\rho_{norm\_iono} &= \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{sat\_1\_grid}^T \\ \mathbf{k}_{sat\_2\_grid}^T \\ \vdots \\ \mathbf{k}_{sat\_N\_grid}^T \end{bmatrix} \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref} \\ &= \mathbf{K}_{sat\_grid} \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref} \end{aligned} \quad (23)$$

40

【 0 0 8 1 】

ピアースポイントの地磁気緯度、及び DO-229 において定義されるような傾斜係数に基づいて、正規化された遅延を、その衛星のための値によってスケールリングすることによって、プロセッサ 16 は、見通し線に沿った実際の（正規化されていない）遅延を得ることができる。ベクトルの形では、プロセッサ 16 は、以下の式を生成する。

【 0 0 8 2 】

【数 3 3】

$$\begin{aligned}
\delta \mathbf{p}_{iono} &= \begin{bmatrix} \sigma_{iono\_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{iono\_2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{iono\_N} \end{bmatrix} \delta \mathbf{p}_{norm\_iono} \\
&= \begin{bmatrix} \sigma_{iono\_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{iono\_2} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{iono\_N} \end{bmatrix} \mathbf{K}_{sat\_grid} \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref} \\
&= \mathbf{\Gamma} \mathbf{K}_{sat\_grid} \mathbf{U}_{grid} \mathbf{x}_{ref}
\end{aligned} \quad (24)$$

10

【0 0 8 3】

電離層遅延誤差共分散行列は、以下のように定義することができる。

【0 0 8 4】

【数 3 4】

$$\begin{aligned}
\mathbf{R}_{iono} &= E[\delta \mathbf{p}_{iono} \delta \mathbf{p}_{iono}^T] \\
&= \mathbf{\Gamma} \mathbf{K}_{sat\_grid} \mathbf{U}_{grid} E[\mathbf{x}_{ref} \mathbf{x}_{ref}^T] \mathbf{U}_{grid}^T \mathbf{K}_{sat\_grid}^T \mathbf{\Gamma}^T \\
&= \mathbf{\Gamma} \mathbf{K}_{sat\_grid} \mathbf{P}_{grid} \mathbf{K}_{sat\_grid}^T \mathbf{\Gamma}^T
\end{aligned} \quad (25)$$

20

$$\mathbf{R}_{iono} = \begin{bmatrix} \sigma_{iono\_1}^2 & E[\delta \rho_{iono\_1} \delta \rho_{iono\_2}] & \cdots & E[\delta \rho_{iono\_1} \delta \rho_{iono\_N}] \\ E[\delta \rho_{iono\_1} \delta \rho_{iono\_2}] & \sigma_{iono\_2}^2 & \cdots & E[\delta \rho_{iono\_2} \delta \rho_{iono\_N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[\delta \rho_{iono\_1} \delta \rho_{iono\_N}] & E[\delta \rho_{iono\_2} \delta \rho_{iono\_N}] & \cdots & \sigma_{iono\_N}^2 \end{bmatrix}$$

30

【0 0 8 5】

擬似距離測定誤差の残りは、衛星  $i$  のための  $other\_i$  によって表される合成 1 値と相関がないものと仮定される。簡単にするために、プロセッサ 16 は、衛星毎の 1 値が一定の 6 メートルであると仮定することができる。その際、全測定誤差共分散行列は以下のとおりである。

【0 0 8 6】

【数 3 5】

$$\mathbf{R} = \mathbf{W}^{-1} = \mathbf{R}_{iono} + \begin{bmatrix} \sigma_{other\_1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{other\_2}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \sigma_{other\_N}^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

40

【0 0 8 7】

スナップショット RAIM 手法では、衛星間の相関は、格子を使用することなく直接計算される。衛星間の相関を直接計算することは、格子を使用する場合よりも簡単であり、且つわずかにより正確であることもある。

【0 0 8 8】

具体的には、電離層誤差共分散は、電離層殻（地面から 350 km 上空にある）に沿ったピアースポイント間の大圏距離の関数としてモデル化することができる。

【0 0 8 9】

50

【数 3 6】

$$E[\delta\rho_{iono\_i}\delta\rho_{iono\_j}] = \sigma_{iono\_i}\sigma_{iono\_j}\left[1 - \left(1 - e^{-d_{ij}/d_{iono}}\right)^2\right]$$

【0 0 9 0】

式中、

d<sub>ij</sub> = 衛星 i 及び j のためのピアースポイント間の大圏距離d<sub>iono</sub> = 無相関距離 = 4 0 0 0 k m

である。

【0 0 9 1】

電離層誤差は大きく相関する。したがって、以下の式が成り立つ。

【0 0 9 2】

【数 3 7】

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} = (\mathbf{R}_{iono} + \mathbf{R}_{other})^{-1}$$

【0 0 9 3】

ただし、以下の 2 つの式が成り立つ。

【0 0 9 4】

【数 3 8】

$$\mathbf{R}_{iono} = \begin{bmatrix} \sigma_{iono\_1}^2 & E[\delta\rho_{iono\_1}\delta\rho_{iono\_2}] & \cdots & E[\delta\rho_{iono\_1}\delta\rho_{iono\_N}] \\ E[\delta\rho_{iono\_1}\delta\rho_{iono\_2}] & \sigma_{iono\_2}^2 & \cdots & E[\delta\rho_{iono\_2}\delta\rho_{iono\_N}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E[\delta\rho_{iono\_1}\delta\rho_{iono\_N}] & E[\delta\rho_{iono\_2}\delta\rho_{iono\_N}] & \cdots & \sigma_{iono\_N}^2 \end{bmatrix}$$

20

30

$$\mathbf{R}_{other} = \begin{bmatrix} \sigma_{other\_1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{other\_2}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{other\_N}^2 \end{bmatrix}$$

【0 0 9 5】

重み付けされた最小二乗解のための誤差共分散

40

ステップ 2 4 0 では、プロセッサ 1 6 が、重み付けされた最小二乗解を計算する。更新後解における誤差は以下のとおりである。

【0 0 9 6】

【数 3 9】

$$\delta\hat{\mathbf{x}} = \Delta\hat{\mathbf{x}} - \Delta\mathbf{x}$$

$$= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta\hat{\mathbf{p}} - \Delta\mathbf{x} \quad (27)$$

【0 0 9 7】

(27) に (2) を代入すると、以下の式が生成される。

【0 0 9 8】

50

【数 4 0】

$$\begin{aligned}
 \delta \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} (\mathbf{H} \Delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{p}) - \Delta \mathbf{x} \\
 &= \Delta \mathbf{x} - (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \delta \mathbf{p} - \Delta \mathbf{x} \\
 &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \delta \mathbf{p} \\
 &= \mathbf{S} \delta \mathbf{p}
 \end{aligned} \tag{28}$$

【0 0 9 9】

こうして、解行列  $\mathbf{S}$  は、擬似距離誤差を、更新後解誤差ベクトルにマッピングする。解誤差共分散行列は以下のように定義することができる。

【0 1 0 0】

【数 4 1】

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P} &= E[\delta \hat{\mathbf{x}} \delta \hat{\mathbf{x}}^T] = \mathbf{S} E[\delta \mathbf{p} \delta \mathbf{p}^T] \mathbf{S}^T \\
 &= \mathbf{S} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{S}^T \\
 &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{W} \mathbf{H} (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \\
 &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1}
 \end{aligned} \tag{29}$$

【0 1 0 1】

$x$  及び  $y$  水平位置誤差は、 $\mathbf{P}$  の上  $2 \times 2$  部分によって統計的に記述される。水平位置誤差楕円の長軸及び短軸は、この  $2 \times 2$  行列の最大固有値及び最小固有値の平方根に等しく、対応する方向における 1 誤差を表す。こうして、最悪方向における 1 誤差は以下の式によって与えられる。

【0 1 0 2】

【数 4 2】

$$\begin{aligned}
 \sigma_{horz\_max} &= \sqrt{\lambda_{\max}^{P(1:2,1:2)}} \\
 &= \sqrt{\frac{p_{11} + p_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{p_{11} - p_{22}}{2}\right)^2 + (p_{12})^2}}
 \end{aligned} \tag{30}$$

【0 1 0 3】

垂直位置における 1 誤差は以下の式によって与えられる。

【0 1 0 4】

【数 4 3】

$$\sigma_{vert} = \sqrt{p_{33}} \tag{31}$$

【0 1 0 5】

水平性能指数は、保存的な 95% 無障害誤差限界であり、誤差共分散行列から、2 D R M S 誤差として、プロセッサ 16 によって計算されることができる。

【0 1 0 6】

【数 4 4】

$$HFOM = 2\sqrt{P(1,1) + P(2,2)}$$

【0 1 0 7】

同様に、垂直性能指数は、誤差共分散行列から、2 垂直誤差として、プロセッサ 16 によって計算されることができる。

【0 1 0 8】

【数 4 5】

$$VFOM = 2\sqrt{P(3,3)}$$

【0 1 0 9】

パリティ空間 R A I M

ステップ 2 5 0 では、プロセッサ 1 6 は、少なくとも 1 つの保護レベル値を計算する。それを果たす際に、プロセッサ 1 6 は、パリティ空間技法を利用することができる。重み付けされた最小二乗解は、以下のように表すことができることを思い起こされたい。

【0 1 1 0】

【数 4 6】

$$\begin{aligned}\Delta \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \Delta \tilde{\boldsymbol{\rho}} \\ &= \mathbf{S} \Delta \tilde{\boldsymbol{\rho}}\end{aligned}$$

10

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1} = \left( E \left[ \delta \boldsymbol{\rho} \delta \boldsymbol{\rho}^T \right] \right)^{-1}$$

【0 1 1 1】

20

相関がある測定値セットは、プロセッサ 1 6 によって、当該技術分野において既知である行列因数分解法を用いて、重み行列  $\mathbf{W}$  を因数分解することによって、相関がないセットに変換することができる。

【0 1 1 2】

【数 4 7】

$$\mathbf{W} = \mathbf{L}^T \mathbf{L}$$

【0 1 1 3】

式中、 $\mathbf{L}$  は  $\mathbf{W}$  の下三角平方根である。この結果として、以下の式が生成される。

【0 1 1 4】

30

【数 4 8】

$$\begin{aligned}\Delta \hat{\mathbf{x}} &= (\mathbf{H}^T \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{L}^T \mathbf{L} \Delta \tilde{\boldsymbol{\rho}} = \left[ (\mathbf{L} \mathbf{H})^T \mathbf{L} \mathbf{H} \right]^{-1} (\mathbf{L} \mathbf{H})^T \mathbf{L} \Delta \tilde{\boldsymbol{\rho}} \\ &= (\bar{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{H}})^{-1} \bar{\mathbf{H}}^T \Delta \bar{\boldsymbol{\rho}} = \bar{\mathbf{S}} \Delta \bar{\boldsymbol{\rho}}\end{aligned}$$

【0 1 1 5】

式中、

【0 1 1 6】

【数 4 9】

40

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{L} \mathbf{H}, \quad \Delta \bar{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{L} \Delta \tilde{\boldsymbol{\rho}}, \quad \bar{\mathbf{S}} = (\bar{\mathbf{H}}^T \bar{\mathbf{H}})^{-1} \bar{\mathbf{H}}$$

【0 1 1 7】

変換された測定誤差の共分散は以下のとおりである。

【0 1 1 8】

【数 5 0】

$$\begin{aligned}
 E[\delta \bar{\rho} \delta \bar{\rho}^T] &= E[\mathbf{L} \delta \rho \delta \rho^T \mathbf{L}^T] \\
 &= \mathbf{L} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{L}^T = \mathbf{L} (\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \\
 &= \mathbf{L} (\mathbf{L}^{-1} \mathbf{L}^{-T}) \mathbf{L}^T \\
 &= \mathbf{I}_N
 \end{aligned}$$

【0 1 1 9】

10

したがって、変換された測定値は相関がなく、それぞれ単位分散を有することが明らかである。本発明の測定値の式に  $\mathbf{L}$  を乗算することによって、プロセッサ 16 は以下の式を得る。

【0 1 2 0】

【数 5 1】

$$\mathbf{L} \Delta \tilde{\rho} = \mathbf{L} \mathbf{H} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{L} \delta \rho$$

$$\Delta \bar{\rho} = \bar{\mathbf{H}} \Delta \mathbf{x} + \delta \bar{\rho}$$

【0 1 2 1】

プロセッサ 16 は、以下の関係が成り立つような、 $N \times N$  直交行列  $\mathbf{Q}$  を見つけることができる。

20

【0 1 2 2】

【数 5 2】

$$\mathbf{Q} \bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1N} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2N} \\ q_{31} & q_{32} & \cdots & q_{3N} \\ q_{41} & q_{42} & \cdots & q_{4N} \\ \hline q_{51} & q_{52} & \cdots & q_{5N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{N1} & q_{N2} & q_{N3} & q_{NN} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ 0 & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ 0 & 0 & u_{33} & u_{34} \\ 0 & 0 & 0 & u_{44} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

30

【0 1 2 3】

こうして、プロセッサ 16 が測定値の式に  $\mathbf{Q}$  を乗算する場合には、結果として、以下の式が得られる。

【0 1 2 4】

【数 5 3】

$$\mathbf{Q} \Delta \bar{\rho} = \mathbf{Q} \bar{\mathbf{H}} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{Q} \delta \bar{\rho}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \Delta \bar{\rho} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \delta \bar{\rho}$$

【0 1 2 5】

式中、 $\mathbf{A}$  は  $\mathbf{Q}$  の上の  $4 \times N$  部分であり、 $\mathbf{B}$  は下の  $(N - 4) \times N$  部分である。結果として、以下の 2 つの式が成り立つ。

【0 1 2 6】

40

【数 5 4】

$$\mathbf{A}\Delta\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{U}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{A}\delta\bar{\mathbf{p}}$$

$$\mathbf{B}\Delta\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{B}\delta\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{p}$$

【0 1 2 7】

最初の式を用いて、擬似距離誤差を 0 に設定することによって、推定された最小二乗解を求めることができる。

【0 1 2 8】

【数 5 5】

$$\mathbf{A}\Delta\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{U}\Delta\hat{\mathbf{x}} \Rightarrow \Delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{U}^{-1}\mathbf{A}\Delta\bar{\mathbf{p}}$$

10

【0 1 2 9】

上三角行列を逆にすることしか必要としないため、この式は、先に与えられた式よりも効率的である。

第 2 の式は、擬似距離誤差があるときにのみ、0 以外の値であるパリティベクトル  $\mathbf{p}$  を与える。故障がない場合に、パリティ共分散は以下ようになる。

【0 1 3 0】

【数 5 6】

$$\begin{aligned} E[\mathbf{p}\mathbf{p}^T] &= \mathbf{B}E[\delta\bar{\mathbf{p}}\delta\bar{\mathbf{p}}^T]\mathbf{B}^T = \mathbf{B}\mathbf{B}^T \\ &= \mathbf{I}_{N-4} \end{aligned}$$

20

【0 1 3 1】

こうして、パリティ要素もまた、単位分散を有する、無相関のゼロ平均ガウス確率変数である。

一実施形態では、プロセッサ 16 は、 $\mathbf{p}$  バイアスの概念を用いるカイ二乗法を利用する。そのような実施形態では、プロセッサ 16 は、以下のように、判別子（統計検定量） $d$  としてパリティ量の二乗を用いる。

【0 1 3 2】

【数 5 7】

$$d = \mathbf{p}^T \mathbf{p} = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_{N-4}^2$$

30

【0 1 3 3】

その際、判別子は、 $N - 4$  の自由度を有する中心カイ二乗分布を有する。プロセッサ 16 は、この判別子に関するしきい値を設定し、そのしきい値よりも高い場合に故障が宣言される。このしきい値  $D$  は、プロセッサ 16 によって、カイ二乗確率密度関数から計算され、許容可能な誤り警告確率が生成される。

【0 1 3 4】

しきい値が設定されると、検討すべき事柄は、単一の衛星に故障がある結果として判別子がしきい値にちょうど達した場合に、検出を見逃す確率を満たしながら、結果として生成される位置誤差がどの程度大きくなる可能性があるかということである。第  $k$  の衛星におけるバイアス故障の結果として、以下の解誤差及びパリティ量誤差になる。

40

【0 1 3 5】

【数 5 8】

$$\delta \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{S} \delta \mathbf{p} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varepsilon \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{1k} \\ s_{2k} \\ s_{3k} \\ s_{4k} \end{bmatrix} \varepsilon$$

$$\begin{aligned} |\mathbf{p}| &= \sqrt{\mathbf{p}^T \mathbf{p}} \\ &= \sqrt{\delta \mathbf{p}^T \mathbf{L}^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \mathbf{L} \delta \mathbf{p}} \\ &= \varepsilon \sqrt{\Lambda_{kk}} \end{aligned}$$

$$\text{where } \Lambda = \bar{\mathbf{B}}^T \bar{\mathbf{B}} \text{ and } \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{B} \mathbf{L}$$

10

【0 1 3 6】

こうして、パリティバイアスは、以下の勾配関数を通じて、水平位置誤差に関連する。

【0 1 3 7】

【数 5 9】

$$\text{slope}(k) = \frac{\sqrt{s_{1k}^2 + s_{2k}^2}}{\sqrt{\Lambda_{kk}}}$$

【0 1 3 8】

最も大きな勾配を有する衛星は、検出するのが最も難しい。この勾配は  $\text{S l o p e}_{\text{max}}$  と呼ばれる。図 3 は、予想される雑音が存在する場合に、検出するのが最も難しい衛星に関するバイアスがあった場合にのみ生じることになる雑音散乱を表す。結果としてデータの一部分が、検出を見逃す確率に等しい検出しきい値  $D$  の左側に生じようとする特定のバイアスが特に検討対象になる。このバイアスに関連付けられるパリティ量は「 $p$  バイアス」と呼ばれる。

20

【0 1 3 9】

バイアスがある場合に、判別子（パリティ量の二乗）は、 $N - 4$  の自由度を有する非中心カイ二乗分布を有する。カイ二乗分布の非中心性パラメータは、以下のとおりであることが示され得る。

【0 1 4 0】

30

【数 6 0】

$$\lambda = p \text{bias}^2$$

【0 1 4 1】

したがって、非中心カイ二乗確率密度関数を用いて、プロセッサ 16 は、検出を見逃す確率の要求値を満たす、 $p$  バイアスのための値を求めることができる。

その際、水平保護レベル（HPL）は以下のとおりである。

【0 1 4 2】

【数 6 1】

$$\text{HPL} = \text{Slope}_{\text{max}} \cdot p \text{bias}$$

40

【0 1 4 3】

パリティ空間の回転によるガウス法

図 4 を参照すると、さらに直交変換することを通じて、一実施形態が、衛星  $k$  のバイアス故障に起因するパリティ誤差がパリティ空間の軸 1 に完全に沿っているように、パリティ空間を回転させることができる。

【0 1 4 4】

【数 6 2】

$$\mathbf{p}^k = \mathbf{Q}^k \bar{\mathbf{B}} \delta \mathbf{p} = \bar{\mathbf{B}}^k \delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \bar{b}_1^k & \cdots & \bar{b}_k^k & \cdots & \bar{b}_N^k \\ X & \vdots & 0 & \vdots & X \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X & \vdots & 0 & \vdots & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varepsilon \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{b}}^k)^T \\ X \\ X \\ X \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \varepsilon \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \bar{b}_k^k \varepsilon$$

【0 1 4 5】

そのバイアスは軸 1 上にのみ現れるため、その結果はスカラーであり、判別子は一般的に、以下の式を用いて、プロセッサ 16 によって求められることができる。

【0 1 4 6】

【数 6 3】

$$d^k = p_1^k = (\bar{\mathbf{b}}^k)^T \delta \mathbf{p}$$

【0 1 4 7】

故障がない場合、相関のあるランダム誤差  $\mathbf{w}$  だけが存在する。

【0 1 4 8】

【数 6 4】

$$d^k = (\bar{\mathbf{b}}^k)^T \mathbf{w} = (\mathbf{b}^k)^T \mathbf{L} \mathbf{w} = (\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}} \quad 20$$

$$\text{where } \mathbf{B}^k = \mathbf{Q}^k \bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{B}}^k \mathbf{L}^{-1}, \quad \bar{\mathbf{w}} = \mathbf{L} \mathbf{w}, \quad E[\bar{\mathbf{w}} \bar{\mathbf{w}}^T] = \mathbf{I}_N$$

$$\text{Note: } \sigma_{d^k}^2 = E[(d^k)^2] = E[(\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}} \bar{\mathbf{w}}^T \mathbf{b}^k] = E[(\mathbf{b}^k)^T \mathbf{b}^k] = 1$$

【0 1 4 9】

衛星  $k$  におけるバイアス故障に加えて、各衛星における相関のあるランダム誤差  $\mathbf{w}$  がある場合、判別子は、以下の式を用いて、プロセッサ 16 によって求められることができる。

30

【0 1 5 0】

【数 6 5】

$$d^k = \bar{b}_k^k \varepsilon + (\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}}$$

【0 1 5 1】

故障に加えて、雑音が水平位置に及ぼす影響は、以下のとおりである。

【0 1 5 2】

【数 6 6】

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{r}^h &= \mathbf{S}^h \delta \mathbf{p} = \mathbf{s}_k^h \varepsilon + \mathbf{S}^h \mathbf{w} = \mathbf{s}_k^h \varepsilon + \bar{\mathbf{S}}^h \mathbf{L} \mathbf{w} \\ &= \mathbf{s}_k^h \varepsilon + \bar{\mathbf{S}}^h \bar{\mathbf{w}} \end{aligned} \quad 40$$

【0 1 5 3】

式中、 $\mathbf{S}^h$  及び

【0 1 5 4】

【数 6 7】

$$\bar{\mathbf{S}}^h$$

【0 1 5 5】

は、 $\mathbf{S}$  及び

【0 1 5 6】

50

【数 6 8】

 $\bar{\mathbf{S}}_j$ 

【0 1 5 7】

の最初の 2 行であり、

【0 1 5 8】

【数 6 9】

 $\mathbf{s}_k^h$ 

【0 1 5 9】

10

は  $\mathbf{S}^h$  の列  $k$  である。

ガウス確率密度関数を用いると、誤り警告の確率を満たすしきい値  $D$  は、プロセッサ 16 によって求められることができる。検出時に、判別子量はしきい値に等しい。

【0 1 6 0】

【数 7 0】

$$|d^k| = \left| \bar{b}_k^k \varepsilon + (\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}} \right| = D$$

【0 1 6 1】

故障が正であり、雑音よりもはるかに大きいものと仮定すると、以下の式が成り立つ。

20

【0 1 6 2】

【数 7 1】

$$|\bar{b}_k^k| \varepsilon + (\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}} = D \Rightarrow \varepsilon = \frac{D}{|\bar{b}_k^k|} - \frac{(\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}}}{|\bar{b}_k^k|}$$

【0 1 6 3】

結果として生成される水平位置誤差は、プロセッサ 16 によって、以下の式を用いて求められることができる。

【0 1 6 4】

30

【数 7 2】

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{r}^h &= \mathbf{s}_k^h \varepsilon + \bar{\mathbf{S}}^h \bar{\mathbf{w}} = \mathbf{s}_k^h \left( \frac{D}{|\bar{b}_k^k|} - \frac{(\mathbf{b}^k)^T \bar{\mathbf{w}}}{|\bar{b}_k^k|} \right) + \bar{\mathbf{S}}^h \bar{\mathbf{w}} \\ &= \mathbf{s}_k^h \left( \frac{D}{|\bar{b}_k^k|} - \frac{1}{|\bar{b}_k^k|} \sum_{i=1}^N b_i^k \bar{w}_i \right) + \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{s}}_i^h \bar{w}_i \end{aligned}$$

【0 1 6 5】

故障の方向における位置誤差量は、以下のとおりである。

40

【0 1 6 6】

【数 7 3】

$$\begin{aligned}
 \delta r_k^h &= \frac{\mathbf{s}_k^h}{|\mathbf{s}_k^h|} \cdot \delta \mathbf{r}^h \\
 &= |\mathbf{s}_k^h| \left( \frac{D}{|\bar{\mathbf{b}}_k^k|} - \frac{1}{|\bar{\mathbf{b}}_k^k|} \sum_{i=1}^N b_i^k \bar{w}_i \right) + \sum_{i=1}^N \frac{\mathbf{s}_k^h \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h}{|\mathbf{s}_k^h|} \bar{w}_i \\
 &= \underbrace{\frac{|\mathbf{s}_k^h|}{|\bar{\mathbf{b}}_k^k|} D}_{\text{Bias}} + \underbrace{\frac{1}{|\bar{\mathbf{b}}_k^k|} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\mathbf{s}_k^h \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h}{|\mathbf{s}_k^h|} |\bar{\mathbf{b}}_k^k| - |\mathbf{s}_k^h| b_i^k \right)}_{\text{Noise}} \bar{w}_i
 \end{aligned}$$

【0 1 6 7】

ランダム擬似距離誤差は単位分散と相関がないため、平均についての雑音項の分散は、プロセッサ 16 によって、以下の式を用いて求められることができる。

【0 1 6 8】

【数 7 4】

$$\sigma_{\delta r_k^h} = \sqrt{\frac{1}{|\bar{\mathbf{b}}_k^k|} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\mathbf{s}_k^h \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h}{|\mathbf{s}_k^h|} |\bar{\mathbf{b}}_k^k| - |\mathbf{s}_k^h| b_i^k \right)^2}$$

【0 1 6 9】

衛星 k のための水平保護レベルは、プロセッサ 16 によって、以下の式を用いて求められることができる。

【0 1 7 0】

【数 7 5】

$$\begin{aligned}
 \text{HPL}_k &= \frac{\mathbf{s}_k^h}{|\mathbf{s}_k^h|} D + K_{md} \sigma_{\delta r_k^h} \\
 &= \frac{\mathbf{s}_k^h}{|\mathbf{s}_k^h|} K_{fa} + K_{md} \sigma_{\delta r_k^h}
 \end{aligned}$$

【0 1 7 1】

式中、 $K_{md}$  及び  $K_{fa}$  は、誤り警告の確率、及び検出を見逃す確率を満たすために設定される乗数である。

この過程は N 個全ての衛星の場合に繰り返され、プロセッサ 16 は、以下の式を用いて全 HPL を求めることができる。

【0 1 7 2】

【数 7 6】

$$\text{HPL} = \max(\text{HPL}_k), \quad k=1, N$$

【0 1 7 3】

電離層誤差モデル計算

電離層格子点及びピアースポイント座標の決定

カルマンフィルタ手法の場合、且つ (17) を利用するために、プロセッサ 16 は最初に、各格子点の座標、及び衛星の電離層ピアースポイントの座標を決定することができる。その後、それらの 2 組の座標を用いて、プロセッサ 16 は、ピアースポイントと格子点との間の大圏距離を計算することができる。カルマンフィルタ、又はスナップショット R

10

20

30

40

50

A I Mのいずれの手法の場合でも、点 i（たとえば、図 1 に示されるシステム、すなわち「ユーザ」）の座標、並びに点 i から点 j（たとえば、格子点）までの距離及び方位角がわかるとき、プロセッサ 16 は、以下のように、点 j の座標を決定することができる。

【 0 1 7 4 】

【 数 7 7 】

$$\lambda_j = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \lambda_i \cos \psi_{ij} + \cos \lambda_i \sin \psi_{ij} \cos A_{ij}}{\sqrt{(\cos \lambda_i \cos \psi_{ij} - \sin \lambda_i \sin \psi_{ij} \cos A_{ij})^2 + \sin^2 \psi_{ij} \sin^2 A_{ij}}} \right) \quad (\text{A.1})$$

10

$$\Lambda_j = \Lambda_i + \tan^{-1} \left( \frac{\sin \psi_{ij} \sin A_{ij}}{\cos \lambda_i \cos \psi_{ij} - \sin \lambda_i \sin \psi_{ij} \cos A_{ij}} \right) \quad (\text{A.2})$$

【 0 1 7 5 】

式中、

- $\lambda_i$  = 点 i の測地緯度
- $\lambda_j$  = 点 j の測地緯度
- $\lambda_i$  = 点 i の測地経度
- $\lambda_j$  = 点 j の測地経度
- $A_{ij}$  = 点 i から点 j までの方位角（方位）
- $\psi_{ij}$  = 点 i から点 j までの角距（地球の中心角）  
=  $d_{ij} / (R_e + h_I)$
- $d_{ij}$  = 点 i から点 j までの大圏距離
- $R_e$  = 地球の半径 = 6 3 7 8 k m
- $h_I$  = 電離層薄殻モデルの高さ = 3 5 0 k m

20

である。

【 0 1 7 6 】

衛星の電離層ピアースポイントの座標も、( A . 1 ) 及び ( A . 2 ) を用いて計算することができる。この場合、 $\psi_{ij}$  はユーザ位置からピアースポイントまでの中心角を表し、プロセッサ 16 によって、以下のように計算されることができる。

30

【 0 1 7 7 】

【 数 7 8 】

$$\psi_{ij} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1} \left( \frac{R_e}{R_e + h_I} \cos E \right) \quad (\text{A.3})$$

【 0 1 7 8 】

式中、E は、局所接平面に対するユーザ位置からの衛星の仰角である。

衛星の仰角及び方位角を計算する

衛星の仰角 E は、見通しベクトルがユーザの局所接平面（水平面）と成す角度と定義される。衛星の方位角 A は、水平面において測定されるような、真北に対する見通しベクトルの角度である。したがって、以下の関係が成り立つ。

40

【 0 1 7 9 】

【数 7 9】

$$E = \text{ATAN2}\left(-u_{\text{LOS}_z}, \sqrt{u_{\text{LOS}_x}^2 + u_{\text{LOS}_y}^2}\right) \quad (\text{A.4})$$

$$A_0 = \text{ATAN2}(u_{\text{LOS}_y}, u_{\text{LOS}_x}) + \alpha \quad (\text{A.5})$$

$$A = \begin{cases} A_0, & -\pi \leq A_0 < \pi \\ A_0 - 2\pi, & A_0 \geq \pi \\ A_0 + 2\pi, & A_0 < -\pi \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

【0 1 8 0】

10

式中、

【0 1 8 1】

【数 8 0】

 $u_{\text{LOS}_x}, u_{\text{LOS}_y}, u_{\text{LOS}_z}$ 

【0 1 8 2】

は見通しベクトル

【0 1 8 3】

【数 8 1】

 $\mathbf{u}_{\text{LOS}}^L$ 

20

【0 1 8 4】

の x 成分、y 成分及び z 成分であり、 $\alpha$  はワンダー角（北から x 局所レベル座標軸までの方位角）である。

方位角は、その結果が  $-\pi \sim +\pi$  にあるように、 $\pm 2\pi$  だけ調整されることに留意されたい。

大圏距離の決定

点 i（たとえば、衛星ピアースポイント）から別の点 j（たとえば、格子点）までの電離層薄殻モデルに沿った大圏距離は、プロセッサ 16 によって、以下のように計算されることができる。

【0 1 8 5】

30

【数 8 2】

$$d_{ij} = (R_e + h_f) \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{\cos^2 \lambda_j \sin^2 \Delta \Lambda_{ij} + (\cos \lambda_i \sin \lambda_j - \sin \lambda_i \cos \lambda_j \cos \Delta \Lambda_{ij})^2}}{\cos \lambda_i \cos \lambda_j \cos \Delta \Lambda_{ij} + \sin \lambda_i \sin \lambda_j} \right) \quad (\text{A.7})$$

【0 1 8 6】

式中、

【0 1 8 7】

【数 8 3】

 $\Delta \Lambda_{ij} = \Lambda_j - \Lambda_i$ 

40

【0 1 8 8】

である。

電離層分散モデル

電離層モデル誤差分散を計算するためにプロセッサ 16 によって実行されることができるアルゴリズムは、ICD-GPS-200C 及び DO-229D J. 2.3 に由来することがある。このセクションにおける記号は、このセクションに特有であることに留意されたい。

【0 1 8 9】

衛星の仰角 E を用いて、式 (A.3) を用いることによって、ユーザ位置と、電離層ピ

50

アースポイントの地上投影位置との間の地球の中心角  $\rho_p$  を形成する。

次に、衛星の仰角  $E$ 、方位角  $A$ 、地球の中心角  $\rho_p$  並びにユーザ測地緯度  $\phi_u$  及び経度  $\lambda_u$  を用いて、式 (A.1) 及び (A.2) を用いることによって、ピアースポイント測地緯度  $\phi_p$  及び経度  $\lambda_p$  を求める。

【0190】

電離層ピアースポイントの地磁気緯度の絶対値を形成する。

【0191】

【数84】

$$|\lambda_m| = \left| \lambda_{pp} + 0.064\pi \cos(\Lambda_{pp} - 1.617\pi) \right| \quad \text{ラジアン} \quad (\text{A.8})$$

10

【0192】

地磁気緯度に基づいて、垂直遅延誤差の推定値を形成する。

【0193】

【数85】

$$\tau_{vert} = \begin{cases} 9 \text{ メーター,} & |\lambda_m| \leq 20^\circ \\ 4.5 \text{ メーター,} & 22.5^\circ < |\lambda_m| \leq 55^\circ \\ 6 \text{ メーター,} & |\lambda_m| > 55^\circ \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

【0194】

20

仰角  $E$  を用いて、傾斜係数の二乗を計算する。

【0195】

【数86】

$$F_{pp}^2 = \frac{1}{1 - \left( \frac{R_e \cos(E)}{R_e + h_I} \right)^2} \quad (\text{A.10})$$

【0196】

電離層遅延のモデル化された推定分散を形成する。

【0197】

30

【数87】

$$\sigma_{model}^2 = F_{pp}^2 \tau_{vert}^2 \quad (\text{A.11})$$

【0198】

受信機から入手可能である場合に適用される補償値を用いて、推定される分散を形成する（入手できない場合には、0と仮定する）。

【0199】

【数88】

$$\sigma_{comp}^2 = \left( \frac{CT_{IONO}}{5} \right)^2 \quad (\text{A.12})$$

40

【0200】

電離層遅延の推定される分散を形成する。

【0201】

【数89】

$$\sigma_{iono}^2 = \max(\sigma_{model}^2, \sigma_{comp}^2) \quad (\text{A.13})$$

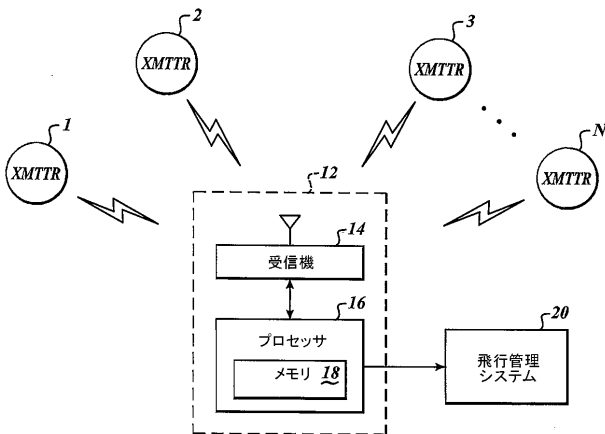
【0202】

本発明の好ましい実施形態が図示及び説明されてきたが、上述されたように、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく、多くの変更を行うことができる。したがって、本発

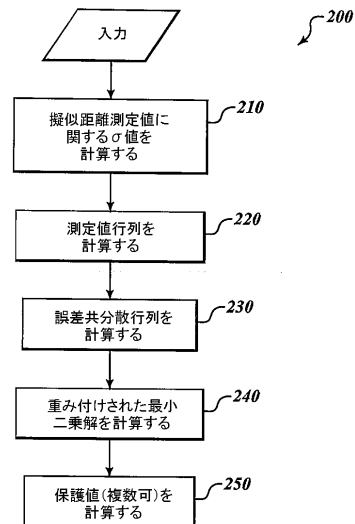
50

明の範囲は、好ましい実施形態の開示によって制限されない。代わりに、本発明は、その全体が以下の特許請求の範囲を参照することによって決定されるべきである。

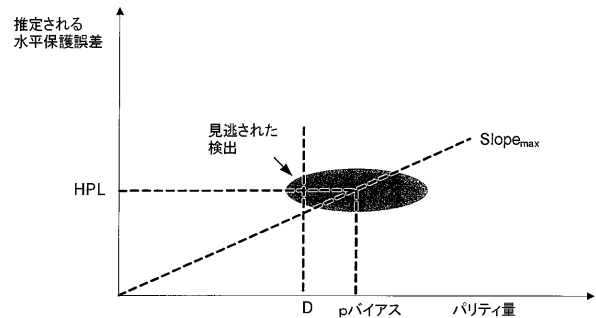
【図 1】



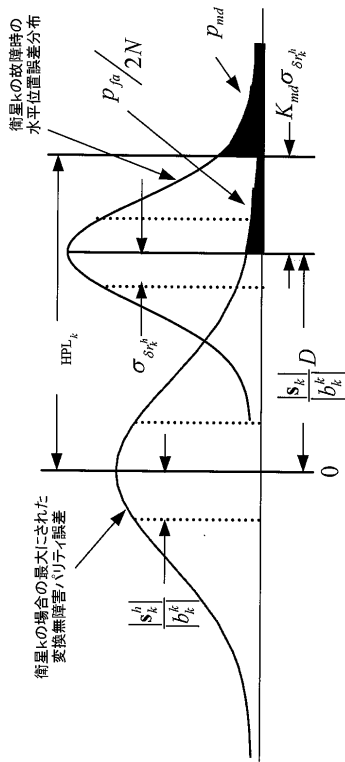
【図 2】



【図 3】



【 図 4 】



【 手続補正書 】

【 提出日 】 平成21年2月20日 (2009.2.20)

【 手続補正 1 】

【 補正対象書類名 】 明細書

【 補正対象項目名 】 0 0 0 8

【 補正方法 】 変更

【 補正の内容 】

【 0 0 0 8 】

【 図 1 】 本発明の実施形態を組み込むナビゲーションシステムを示す図である。

【 図 2 】 本発明の一実施形態による過程を示す図である。

【 図 3 】 予想される雑音が存在する場合に、検出するのが最も難しい衛星に関するバイアスがあった場合に生じることになる雑音散乱を示す図である。

【 図 4 】 衛星 k の最大にされた変換無障害パリティ誤差及び故障時の水平位置誤差分布を示す図である。

---

フロントページの続き

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100147991

弁理士 鳥居 健一

(72)発明者 ケヴィン・ヴァンダーワーフ

アメリカ合衆国ニュージャージー州 0 7 9 6 2 - 2 2 4 5 , モーリスタウン , コロンビア・ロード  
1 0 1 , ピー・オー・ボックス 2 2 4 5

Fターム(参考) 2F129 AA03 BB03 BB33

5H180 AA26 FF05 FF07

5J062 AA06 AA09 BB01 BB03 CC07 DD23 HH09

【外国語明細書】  
2009175134000001.pdf