

# 無線航行援助システムの新しい測位原理と精度評価

小野 房吉 ・ 海洋研究室

## A New Positioning Method of Radio Navigation System and Estimation of its Accuracy

Fusakichi Ono : Marine Reserch Laboratory

### 1. まえがき

無線航行援助システムの電波を受信して受信点の位置を求める場合、測定データの測地座標への変換方法として従来、二つの方法が提案され実行されてきた。一つは双曲線方式であり、もう一つは距離方式（ $\rho$ - $\rho$ 方式）である。双曲線方式は、地球上の適当な位置に配置された、少なくとも三つの電波発射局から一定の関係で同期して発射される電波の二組の到来時間差を測定し、この測定データの一定地点がつくる軌跡が、電波発射アンテナを焦点とする双曲線となり、二本の双曲線（位置の線）が交差する点を受信位置とする原理に基づく。この方式は二局を結ぶ基線から遠ざかるにつれて、双曲線の発散に伴う精度の低下が著しく、基線の延長線付近で測位が困難となる欠点がある。この欠点を多少とも改善しようと言う目的で提案されたのが、もう一つの距離方式である。

距離方式は、電波発射システムが、基準繰り返しパルスの発生源として原子周波数標準など高安定発信器を用いた運用で、受信側も発信側と同様、高安定発信器を備え、送受信双方の基準パルスの独立同期が可能な場合に適用できるもので、利用者システムは高価となる。原理は、極めて簡単で、最初に送受信双方の基準パルスの同期が確立していることが前提であるが、当該電波の到来時を受信点の基準パルスに対して測定したとき、その測定時間差が、送受信点間の電波伝搬時間で測った距離に対応し、送信アンテナから一定距離の地点の軌跡が円となり、二つのデータがつくる位置の円の交点を受信位置とするものである。この方式の欠点は、前提となる送受信双方の、基準パルスの同期の確立のために、他の何らかの測位手段を必要とし、一旦同期が確立しても、基準発信器の微小周波数偏差と、そのドリフトのために、時間の経過とともに誤差が増大するから、定期的な校正が必要であり、単独では測位装置として機能しないことである。加えて二局を結ぶ基線上、及びその延長線付近での測位も困難である。従って、この方式は費用がかさむ割にはメリットが少く特殊な場合以外は使用されない。

以上述べたとおり、従来の双曲線及び距離方式は何れも一長一短であり、改善されるべきいくつかの問題点を残していた。以下に述べる電波航法の新しい測位原理では、測定方法は、従来と同様であるが、データの取得にあたって、従来の方式ではシステムの電波の一部しか利用しなかったのに対し、受信できる電波はすべて利用する有効利用方式とし、データから測地座標への変換方法も従来と全く異なる原理で対応する。

そのため、従来の両方式の欠点は同時に解消するとともに、システム誤差及び長距離伝搬による電波伝搬誤差の評価も可能となり、その結果を測位に反映することで精度の向上をもたらすほか、受信測位システムの製作にあたっては、従来の方式では不可欠であった海域による局の選択も必要としない完全自動化受信機

が可能となる。

## 2. 測位原理

受信点の適当な基準パルスに対して、一定の関係で同期した電波を放射する無線航行援助システムの電波を少くとも三つ、できればそれ以上の局について到来時TD<sub>i</sub>を測定し、データとする。このデータに関し、受信推定位置(λ<sub>0</sub>, φ<sub>0</sub>)を仮定し、そのデータに対応する局位置(λ<sub>i</sub>, φ<sub>i</sub>)との間の電波伝搬時間(τ<sub>i</sub>)及び真方位(Z<sub>i</sub>)を計算して、測定値-計算値(0-C)<sub>i</sub>を求める。

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} TD_1 - ED_1 - \tau_1 &= (0-C)_1 \\ TD_2 - ED_2 - \tau_2 &= (0-C)_2 \\ \dots\dots\dots \\ TD_i - ED_i - \tau_i &= (0-C)_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし ED<sub>i</sub> : 主局に対する従局 i の電波放射遅延時間

こうして、各データの(0-C)が求まると、これに関し次の観測方程式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} (0-C)_1 &= \Delta\phi \cdot \cos Z_1 + \Delta\lambda \cdot \cos \phi_0 \cdot \sin Z_1 + \Delta T \\ (0-C)_2 &= \Delta\phi \cdot \cos Z_2 + \Delta\lambda \cdot \cos \phi_0 \cdot \sin Z_2 - \Delta T \\ \dots\dots\dots \\ (0-C)_i &= \Delta\phi \cdot \cos Z_i + \Delta\lambda \cdot \cos \phi_0 \cdot \sin Z_i + \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし, Δλ, Δφ : 真の受信位置に対する受信推定位置の経緯度偏差

Z<sub>i</sub> : 推定位置から見た対応する局の真方位

ΔT : 受信点の基準パルスの電波放射時に対する同期偏差

この式で、未知数はΔφ, Δλ, ΔTの三つであるから、互いに異った方向から伝搬してくる少くとも3局の電波を受信し、データを三つ取得すると、すべての未知数の解が得られ受信位置(λ<sub>x</sub>, φ<sub>x</sub>)が決定できるとともに、ΔTも同時に確定する。したがって、

$$\lambda_x = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (3)$$

$$\phi_x = \phi_0 + \Delta\phi \quad (4)$$

この観測方程式は、受信点の近傍で平面で展開しているから、受信点と受信推定位置が離れ過ぎていると誤差が生じるので、Δλ, Δφが十分小さくなるまで収束計算を行なって最終位置を決定する。

(なほ、この測位原理については水路部研究報告第18号P131~144に詳述しているので興味のある方は、そちらの方を御覧頂きたい。)

## 3. 測位精度の評価

前項の方法で受信位置が決定したら、その位置に基づいて(1)式を再計算し、ΔTを加えると、その結果は、システムの同期誤差、電波伝搬誤差が無視できるとき、“0”となるべきである。従って、これが“0”とならずある値を示せば、この量はシステム誤差、電波伝搬誤差に対応し、測位精度の評価に有効である。

すなわち、

$$TD_i - ED_i - \tau_i + \Delta T = \delta_i \quad (5)$$

そこで複数のδ<sub>i</sub>につき次式により標準偏差を求める。

$$SD = \left[ \delta_i^2 \right]^{1/2} / (n-1) \quad (6)$$

$i = 1 \sim n$

#### 4. システム誤差の評価

データが三つ以上あると、システム誤差が評価できる。一般に受信電波は、送受信点間の距離が小さい場合、地表波電波の受信が可能であり、精度が良いが、遠距離伝搬波になると空間波が混入し、または、空間波のみとなり、誤差が生ずる。このような場合、受信電波の質を考慮することなく、計算に採用すれば、測位精度を低下させる。このような不利を招かないために、データに“重み”をつけて処理することが有効である。そのため本方式でも、観測方程式の解法に重み計算を行うこととしている。送受信点間の距離 $r_i$ の計算で、これが一定距離までは“重み”1、それを越えた場合は順次1以下とし最小二乗解を得るわけである。もちろんこの場合、重みは距離計算の際自動的に計算し、オペレータが判断する必要はないが、どの距離からどのような方法で重みに変化をつけるかはソフトウェアの問題である。

この重み計算において、極端な場合、つまりある局のデータを重み“0”で採用すると、測位結果に、その局のデータが関与しないので(5)式で計算される $\delta_i$ は、その他の局のデータに誤差がないとしたとき、その局に特有なシステム誤差を与えるから、必要に応じてそのような計算も有効である。

#### 5. 実測データへの適用例

本方式が最も有効であるのは、受信点に適当な基準パルス発生器を備え、これに対してシステムの全局について、データを得ることであるが、従来の双曲線方式のデータでも、主局一局分のマイナスはあるものの多大の効果が期待できる。末尾の表は、ロランC北西太平洋チエンの電波を受信し、主局に対する全従局の相対到来時間差が測定できる受信機（光電製作所製LR-719型）で取得したデータに本方式の原理を適用した結果である。

この例は当該ロランC利用海域としては、最も条件の悪い所であるが精度評価値SDが5 m以内に納っており、この測位原理が相当な効果を発揮していることがわかる。Z局（ヤップ島）の局誤差が70  $\mu$ sと大きく分離されているが、これはこの海域では当該局の電波伝搬距離が3000 kmをはるかに越えており、当然空間波を受信しているからである。W局（南鳥島）までは2500 km程度あるが、この偏差が0.3  $\mu$ s以下であることは、この受信機が、この距離この時刻においても確実に地表波を受信していることを示している。これらの事実は、システムの全局を利用するこの新測位原理が、相当広範な地域で効果的であることも示している。

#### 6. 終りに

三つを越える複数の局の取得データで、受信点の測地位置を求め、その位置における(0-C)が示す、その局特有の局誤差を分離する方法では、取得データの善し悪しが測位毎に数字で表示されるから、利用者はその測位結果の信頼度評価が熟練を要することなく全く機械的に得られる。この測位原理が航海の安全、経済運航、省力化、自動運航システム、高精度な海洋調査活動等に役立てられることを期待する。

新測位原理のロラン C への適用例 (海域: 日本海北部 \*受信機 LR-719 測地系 BESSEL\*利用システム: 北西太平洋チェーン・レート: 9970)

| 月日時分秒         | *-----測定データ(μ SEC.)-----* |         |         |         |         | 緯度 | 経度     | SD<br>X-MTL | REF.<br>μ SEC. | *-----局誤差(μ SEC.)-----* |          |       |       |       | 伝搬速度<br>KM/μ S |       |         |
|---------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|----|--------|-------------|----------------|-------------------------|----------|-------|-------|-------|----------------|-------|---------|
|               | M                         | W       | X       | Y       | Z       |    |        |             |                | M                       | W        | X     | Y     | Z     |                |       |         |
| 06/1205:31:00 | 0.0                       | 17070.7 | 32552.0 | 59738.0 | 86405.9 | 40 | 14.287 | 138         | 54.032         | 3                       | -5766.14 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00           | 0.00  | .299712 |
| 06/1205:36:00 | 0.0                       | 17070.5 | 32553.8 | 59738.9 | 86406.0 | 40 | 14.041 | 138         | 54.225         | 2                       | -5764.51 | 0.01  | -0.19 | -0.01 | 0.00           | 69.61 | .299712 |
| 06/1205:40:00 | 0.0                       | 17068.4 | 32549.6 | 59741.2 | 86406.5 | 40 | 14.236 | 138         | 54.937         | 4                       | -5765.22 | 0.01  | -0.21 | -0.01 | -0.00          | 69.58 | .299712 |
| 06/1205:46:00 | 0.0                       | 17067.1 | 32541.8 | 59740.5 | 86406.6 | 40 | 15.028 | 138         | 54.997         | 2                       | -5770.00 | 0.01  | -0.22 | -0.00 | -0.01          | 69.54 | .299712 |
| 06/1205:51:00 | 0.0                       | 17065.8 | 32534.2 | 59739.6 | 86406.5 | 40 | 15.813 | 138         | 54.987         | 5                       | -5774.82 | 0.00  | -0.21 | -0.00 | -0.01          | 69.50 | .299712 |
| 06/1205:55:00 | 0.0                       | 17064.6 | 32526.6 | 59738.7 | 86406.6 | 40 | 16.580 | 138         | 54.998         | 4                       | -5779.50 | 0.01  | -0.22 | -0.01 | -0.00          | 69.45 | .299712 |
| 06/1206:01:00 | 0.0                       | 17063.4 | 32519.1 | 59737.9 | 86406.6 | 40 | 17.351 | 138         | 55.010         | 3                       | -5784.20 | 0.02  | -0.21 | -0.01 | 0.00           | 69.43 | .299712 |
| 06/1206:06:00 | 0.0                       | 17062.1 | 32511.6 | 59736.9 | 86406.5 | 40 | 18.135 | 138         | 54.977         | 5                       | -5789.04 | 0.02  | -0.18 | -0.01 | 0.01           | 69.39 | .299712 |
| 06/1206:11:00 | 0.0                       | 17060.9 | 32504.1 | 59735.9 | 86406.5 | 40 | 18.907 | 138         | 54.963         | 1                       | -5793.78 | 0.03  | -0.20 | -0.01 | 0.01           | 69.34 | .299712 |
| 06/1206:16:00 | 0.0                       | 17059.7 | 32496.6 | 59735.1 | 86406.6 | 40 | 19.672 | 138         | 54.976         | 4                       | -5798.44 | 0.03  | -0.22 | -0.01 | 0.01           | 69.30 | .299712 |
| 06/1206:21:00 | 0.0                       | 17058.4 | 32489.0 | 59734.1 | 86406.6 | 40 | 20.465 | 138         | 54.955         | 2                       | -5803.32 | 0.03  | -0.22 | -0.01 | 0.00           | 69.26 | .299712 |
| 06/1206:26:00 | 0.0                       | 17057.2 | 32481.4 | 59733.2 | 86406.7 | 40 | 21.259 | 138         | 54.947         | 1                       | -5808.18 | 0.03  | -0.24 | -0.01 | 0.01           | 69.25 | .299712 |
| 06/1206:31:00 | 0.0                       | 17055.9 | 32473.7 | 59732.3 | 86408.5 | 40 | 22.051 | 138         | 54.948         | 1                       | -5813.01 | 0.03  | -0.24 | -0.01 | 0.01           | 69.25 | .299712 |
| 06/1206:36:00 | 0.0                       | 17054.7 | 32466.0 | 59731.3 | 86411.1 | 40 | 22.848 | 138         | 54.944         | 1                       | -5817.89 | 0.03  | -0.24 | -0.01 | 0.01           | 69.83 | .299712 |
| 06/1206:41:00 | 0.0                       | 17053.4 | 32458.2 | 59730.3 | 86410.6 | 40 | 23.663 | 138         | 54.921         | 4                       | -5822.89 | 0.03  | -0.23 | -0.01 | 0.01           | 71.06 | .299712 |
| 06/1206:46:00 | 0.0                       | 17052.2 | 32450.4 | 59729.5 | 86410.7 | 40 | 24.473 | 138         | 54.949         | 3                       | -5827.82 | 0.03  | -0.24 | -0.01 | 0.00           | 71.72 | .299712 |
| 06/1206:51:00 | 0.0                       | 17050.3 | 32442.3 | 59729.5 | 86410.8 | 40 | 25.241 | 138         | 55.186         | 2                       | -5832.36 | 0.02  | -0.20 | -0.01 | 0.00           | 72.17 | .299712 |
| 06/1206:56:00 | 0.0                       | 17048.6 | 32434.1 | 59729.4 | 86410.9 | 40 | 26.015 | 138         | 55.417         | 2                       | -5836.94 | 0.03  | -0.20 | -0.01 | 0.00           | 72.42 | .299712 |
| 06/1207:01:00 | 0.0                       | 17047.3 | 32426.3 | 59728.5 | 86410.9 | 40 | 26.825 | 138         | 55.443         | 2                       | -5841.87 | 0.03  | -0.18 | -0.01 | 0.01           | 72.57 | .299712 |
| 06/1207:06:00 | 0.0                       | 17046.0 | 32418.6 | 59727.7 | 86410.8 | 40 | 27.618 | 138         | 55.453         | 2                       | -5846.71 | 0.03  | -0.16 | -0.01 | 0.01           | 72.61 | .299712 |
| 06/1207:11:00 | 0.0                       | 17044.8 | 32411.1 | 59726.8 | 86410.8 | 40 | 28.411 | 138         | 55.448         | 4                       | -5851.56 | 0.02  | -0.13 | -0.01 | 0.01           | 72.61 | .299712 |
| 06/1207:16:00 | 0.0                       | 17043.7 | 32403.5 | 59725.7 | 86410.7 | 40 | 29.223 | 138         | 55.400         | 4                       | -5856.56 | 0.01  | -0.11 | -0.01 | 0.00           | 72.56 | .299712 |
| 06/1207:20:00 | 0.0                       | 17042.5 | 32395.9 | 59724.7 | 86410.6 | 40 | 30.026 | 138         | 55.376         | 3                       | -5861.47 | 0.01  | -0.09 | -0.00 | -0.00          | 72.51 | .299712 |
| 06/1207:26:00 | 0.0                       | 17041.2 | 32388.2 | 59723.8 | 86410.6 | 40 | 30.836 | 138         | 55.377         | 2                       | -5866.43 | 0.00  | -0.08 | -0.00 | -0.00          | 72.42 | .299712 |
| 06/1207:31:00 | 0.0                       | 17039.9 | 32380.6 | 59722.9 | 86410.5 | 40 | 31.635 | 138         | 55.382         | 1                       | -5871.31 | -0.00 | -0.07 | -0.00 | -0.00          | 72.36 | .299712 |
| 06/1207:35:00 | 0.0                       | 17038.7 | 32373.1 | 59722.1 | 86410.5 | 40 | 32.428 | 138         | 55.388         | 0                       | -5876.15 | -0.00 | -0.07 | -0.00 | -0.00          | 72.27 | .299712 |
| 06/1207:40:00 | 0.0                       | 17037.5 | 32365.5 | 59721.3 | 86410.5 | 40 | 33.213 | 138         | 55.412         | 2                       | -5880.95 | 0.00  | -0.06 | -0.00 | -0.00          | 72.18 | .299712 |
| 06/1207:46:00 | 0.0                       | 17036.3 | 32358.0 | 59720.3 | 86410.5 | 40 | 34.013 | 138         | 55.404         | 3                       | -5885.84 | 0.00  | -0.02 | -0.00 | 0.00           | 72.11 | .299712 |
| 06/1207:51:00 | 0.0                       | 17035.1 | 32350.5 | 59719.5 | 86410.5 | 40 | 34.804 | 138         | 55.401         | 4                       | -5890.67 | -0.00 | -0.01 | -0.00 | -0.00          | 72.03 | .299712 |
| 06/1207:56:00 | 0.0                       | 17033.9 | 32343.1 | 59718.5 | 86410.4 | 40 | 35.601 | 138         | 55.378         | 4                       | -5895.57 | -0.01 | 0.02  | 0.00  | -0.01          | 71.95 | .299712 |
| 06/1208:01:00 | 0.0                       | 17032.6 | 32335.4 | 59717.5 | 86410.4 | 40 | 36.424 | 138         | 55.360         | 3                       | -5900.60 | -0.02 | 0.02  | 0.00  | -0.01          | 71.88 | .299712 |
| 06/1208:06:00 | 0.0                       | 17031.3 | 32327.5 | 59716.7 | 86410.3 | 40 | 37.260 | 138         | 55.384         | 2                       | -5905.69 | -0.02 | 0.01  | 0.00  | -0.01          | 71.80 | .299712 |
| 06/1208:11:00 | 0.0                       | 17030.0 | 32319.6 | 59715.8 | 86410.3 | 40 | 38.098 | 138         | 55.404         | 1                       | -5910.81 | -0.03 | 0.03  | 0.01  | -0.02          | 71.70 | .299712 |
| 06/1208:16:00 | 0.0                       | 17028.8 | 32311.8 | 59714.7 | 86410.2 | 40 | 38.942 | 138         | 55.348         | 5                       | -5916.02 | -0.03 | 0.06  | 0.01  | -0.02          | 71.61 | .299712 |
| 06/1208:21:00 | 0.0                       | 17027.6 | 32304.0 | 59713.7 | 86410.2 | 40 | 39.781 | 138         | 55.329         | 1                       | -5921.15 | -0.04 | 0.05  | 0.01  | -0.03          | 71.52 | .299712 |
| 06/1208:26:00 | 0.0                       | 17026.2 | 32296.0 | 59712.9 | 86410.2 | 40 | 40.619 | 138         | 55.387         | 5                       | -5926.24 | -0.03 | 0.07  | 0.01  | -0.02          | 71.46 | .299712 |
| 06/1208:31:00 | 0.0                       | 17024.9 | 32288.2 | 59712.1 | 86410.3 | 40 | 41.450 | 138         | 55.409         | 1                       | -5931.31 | -0.03 | 0.09  | 0.01  | -0.01          | 71.39 | .299712 |
| 06/1208:36:00 | 0.0                       | 17023.5 | 32280.4 | 59711.1 | 86410.2 | 40 | 42.297 | 138         | 55.386         | 2                       | -5936.51 | -0.03 | 0.11  | 0.01  | -0.01          | 71.33 | .299712 |
| 06/1208:41:00 | 0.0                       | 17022.3 | 32272.6 | 59710.0 | 86410.2 | 40 | 43.141 | 138         | 55.353         | 5                       | -5941.69 | -0.03 | 0.09  | 0.01  | -0.02          | 71.26 | .299712 |
| 06/1208:46:00 | 0.0                       | 17021.0 | 32265.0 | 59709.1 | 86410.2 | 40 | 43.962 | 138         | 55.354         | 2                       | -5946.74 | -0.02 | 0.07  | 0.01  | -0.01          | 71.22 | .299712 |
| 06/1208:51:00 | 0.0                       | 17019.7 | 32257.2 | 59708.2 | 86410.2 | 40 | 44.802 | 138         | 55.342         | 3                       | -5951.87 | -0.03 | 0.07  | 0.00  | -0.01          | 71.16 | .299712 |
| 06/1208:55:00 | 0.0                       | 17018.5 | 32249.5 | 59707.4 | 86410.1 | 40 | 45.636 | 138         | 55.370         | 2                       | -5956.96 | -0.03 | 0.05  | 0.01  | -0.01          | 71.08 | .299712 |
| 06/1209:01:00 | 0.0                       | 17017.2 | 32241.7 | 59706.5 | 86410.1 | 40 | 46.467 | 138         | 55.377         | 4                       | -5962.02 | -0.03 | 0.08  | 0.00  | -0.01          | 71.01 | .299712 |
| 06/1209:06:00 | 0.0                       | 17015.9 | 32234.0 | 59705.5 | 86410.0 | 40 | 47.309 | 138         | 55.370         | 1                       | -5967.18 | -0.04 | 0.08  | 0.01  | -0.02          | 70.92 | .299712 |
| 06/1209:11:00 | 0.0                       | 17014.6 | 32226.2 | 59704.6 | 86410.0 | 40 | 48.154 | 138         | 55.362         | 1                       | -5972.37 | -0.04 | 0.09  | 0.01  | -0.02          | 70.83 | .299712 |
| 06/1209:16:00 | 0.0                       | 17013.2 | 32218.4 | 59703.7 | 86410.1 | 40 | 48.996 | 138         | 55.383         | 2                       | -5977.50 | -0.04 | 0.08  | 0.01  | -0.02          | 70.77 | .299712 |
| 06/1209:20:00 | 0.0                       | 17011.8 | 32210.5 | 59702.8 | 86410.1 | 40 | 49.852 | 138         | 55.402         | 1                       | -5982.74 | -0.04 | 0.07  | 0.02  | -0.02          | 70.72 | .299712 |
| 06/1209:25:00 | 0.0                       | 17010.7 | 32203.3 | 59701.8 | 86410.4 | 40 | 49.776 | 138         | 55.943         | 4                       | -5981.91 | -0.04 | 0.02  | 0.01  | -0.02          | 70.68 | .299712 |
| 06/1209:31:00 | 0.0                       | 17010.6 | 32213.5 | 59706.3 | 86410.6 | 40 | 49.223 | 138         | 56.210         | 3                       | -5978.38 | -0.05 | 0.06  | 0.02  | -0.03          | 70.59 | .299712 |
| 06/1209:36:00 | 0.0                       | 17010.5 | 32215.2 | 59707.5 | 86410.8 | 40 | 48.929 | 138         | 56.494         | 3                       | -5976.37 | -0.04 | -0.01 | 0.01  | -0.03          | 70.57 | .299712 |