レーダによる他船ベクトル解析について

邱 民*・今 津 隼 馬**・杉 崎 昭 生**

Target Vector Analysis Using Radar Data

QIU Min, Hayama IMAZU and Akio M. SUGISAKI

Abstract

Although the radar display presents the successive of target echo, but the measurement point of the target echo is not the point of target's center, because the shape of target echo is changed by target's size, range and aspect.

This paper described about theoretical errors of the measurement point by two measurement methods, the root mean square of bearing random error obtained by experiment, and the effect of theoretical errors and measurement errors on vector analysis. Then some useful results were obtained for measurement method of target echo and vector analysis.

1. はじめに

今までの他船レーダ情報は、自船からの相対位置、すなわち自船からの方位と距離によるポイント情報のみである。ここでは他船のレーダ映像が、他船の船型、相対距離ならびにアスペクトに応じて、ある大きさを持つことを考慮し、他船の船体中央点と映像測定点の位置の差を理論的に求めた（理論誤差）。また観測値の偶然誤差については実船実験により計測した。そして、このような観測値を使用して他船ベクトル解析を行う場合の問題点について考察してみた。この結果理論誤差を少なくする観測方法、他船ベクトル解析の問題点ならびに、観測値の理論誤差修正による他船ベクトル解析精度の向上について明らかとなったのでここに報告する。

2. レーダ観測原理と理論誤差

2.1 レーダ観測原理

レーダによる他船の映像は他船の船型、相対距離ならびにアスペクトに応じてある大きさを持つ。図1はレーダ映像前面と他船の関係を示したものである。ここで他船の船型は船長の前半分を楕円形、後半分を矩形としている。図から明らかなように、レーダ映像の前面は他船の自船（点0）から見た最短距離の部分で他船と接し（点B）、その他の部分ではレーダ・ビーム幅の影響で他船の面より自船に近い所に表われる。このためレーダ映像前面を使った測定値と、他船の船体中央値との間には差を生ずる。

ここでレーダ映像前面を使った二つの測定点について考えてみる。

i) 測定点A：距離は図1の $\overline{OB}$ ，すなわち自船から見た

図1 船体中央点とレーダによる観測点

* 正会員 上海船舶運輸科学研究所（上海市民生路60号）

** 正会員 東京商船大学（江東区越中島2-1-6）

映像の最短距離とし、方位はレーダ映像前面の2等分線による方位（映像中央方位）により決まる点。

- ii) 測定点B：距離は測定点Aと同様自船から見た映像の最短距離、方位は前記の最短距離測定点の方位（映像最短距離方位）により決まる点。

この測定点と船体中央点の差は、それぞれ距離差Rおよび方位差で表わされる。すなわち

$$\text{距離差 } R = \text{船体中央点距離} - \overline{OB}$$

$$\text{方位差 } A = \text{船体中央点方位} - \text{映像中央方位}$$

$$\text{方位差 } B = \text{船体中央点方位} - \text{映像最短距離方位}$$

図2 距離差と方位差のアスペクトによる変化

ある。すなわち距離が近くなればなるほど、方位差Bの最大値は大きくなる。またアスペクトが、0°、90°及び180°の時方位差Bは零となり、アスペクト90°をはさんだ方位差Bの変化は非対称である。これは他船の船型が前後非対称のためである。またアスペクト90°をはさむ前後40°の範囲での方位差Bの変化の大きさは、測定点Bの大きな問題である。

- iii) 方位差Aも方位差Bと同様他船の距離及びアスペクトに密接な関係がある。すなわち距離が近くなればなるほど、方位差Aの最大値は大きくなり、最大値となるアスペクトは145°付近である。例えば、0.5海里における方位差Aの最大値は0°.66である。

この結果測定点Aと測定点Bの大きな違いは方位差Aと方位差Bの差であることが判った。図2から明らかのように方位差Bのアスペクト変化による変化は方位差Aに比べ非常に大きく、またその最大値も大きいことから、測定点Bは測定点として不適であると言える。このため今後は測定点として測定点Aを採用することとする。なお測定点Aは従来のレーダによる他船測定点と一致するものである。

2.2 レーダ情報の理論誤差

前記の距離差Rおよび方位差A以外に、測定値には量子化による影響がある。通常の船用レーダはアンテナ回転数が約20r.p.m.であり、パルス繰返しレートは1,000p.p.s.である。このため方位測定値は0°.12単位となり、距離レンジの最小測定目盛の単位が0.01海里であることから、距離測定は0.01海里単位となる。

この量子化による誤差と前述の方位差A、距離差Rの合成値を今後理論誤差と呼ぶことにする。ここでは他船が自船の横を通過する時の測定点の理論誤差ならびにこのような測定点情報を使って求めた相対ベクトル⁽¹⁾の誤差について考察した。ここで考えたケースは次の3ケースである。ここで自船船首方向をY軸、右正横方向をX軸とする。

- i) ケース1：他船の自船との針路差180°、相対速力12ノット、初期相対位置 $x=0.5$ 海里、 $y=2$ 海里。すなわち最接近距離0.5海里、最接近時間10分の場合。
- ii) ケース2：他船の自船との針路差180°、相対速力12ノット、初期相対位置 $x=1.5$ 海里、 $y=2$ 海里。すなわち最接近距離1.5海里、最接近時間10分の場合。
- iii) ケース3：他船の自船との針路差180°、相対速力36ノット、初期相対位置 $x=0.5$ 海里、 $y=5$ 海里。すな

となる。これより船体中央点と測定点Aの差は距離差Rと方位差Aにより、船体中央点と測定点Bの差は距離差Rと方位差Bにより示される。図2は図1の他船の船長を200m、船幅を30mとし、自船からの相対距離をそれぞれ0.5, 1.0, 1.5海里として他船のアスペクトを0°~180°変化させた時の距離差R、方位差A、Bを求めたものである。ここで図の横軸は他船アスペクトであり、縦軸は上から距離差R（単位：メートル）、方位差B（単位：度）、方位差A（単位：度）である。これにより次の事が判明した。

- i) 距離差Rは他船の距離にはほぼ無関係で、アスペクトに密接に関係している。距離差Rはアスペクトが±90°において最小となり、最小値は船幅の半分である。またアスペクトが0°あるいは180°に近づくほど最大値（船長の半分）に近づく。

- ii) 方位差Bは他船の距離及びアスペクトに密接な関係がある。

わち最接近距離 0.5 海里, 最接近時間約 8.3 分の場合。

これら 3 ケースについて距離差および方位差の理論誤差と, それらのデータの 1 分間隔の値を使って求めた相対速力, 針路の誤差を図示したのが図 3 である。図の横軸は初期位置からの経過時間 (単位: 分) であり, 矢印は最接近時間を示す。縦軸は上から距離理論誤差 (単位: メートル), 方位理論誤差 (単位: 度), 相対速力誤差 (単位: ノット), 相対針路誤差 (単位: 度) である。また左から右へそれぞれケース 1, 2, 3 の場合を示す。これにより次の事が判明した。

図 3 距離・方位理論誤差とベクトル解析結果

- i) 距離理論誤差は最接近時間付近で最小となり, 最接近距離が小さくなるほどまた相対速力が大きいほど単位時間の変化は大きい。これはベクトル解析時の距離理論誤差の影響が大きい事を意味する。
- ii) 方位理論誤差は最接近時間直後に大きくなり, 最接近距離が小さくなるほど大きくなる。また相対速力が大きいほど単位時間の変化は大きい。しかし最接近時以前においては方位差そのものが小さいので, 相対的には若干あるものの, 絶対値としてはほとんど無視できるほどである。
- iii) 相対速力誤差は前記の i) ii) の結果から, 最接近時以前では距離理論誤差の影響を, また最接近時以後では距離・方位理論誤差の影響を大きく受けることが判る。図から相対速力誤差は最接近時間の前後で大きくなり, 最接近距離が小さくなるほど, そして相対速力が大きくなるほど大きくなることが判る。すなわち最接近時以前においては相対速力を実際より大き目に測定することになる。
- iv) 相対針路誤差は相対速力誤差と同様, 最接近時以前では距離理論誤差の影響を, 最接近時以後では距離・方位理論誤差の影響を大きく受けることが判る。図から相対針路誤差は最接近距離が小さくなるほど, 相対速力が小さいほど大きくなることが判る。そして, それは最接近時以前では自船に近づくように見え, 最接近時以後は自船から遠ざかるように見える。

この結果距離・方位理論誤差がベクトル解析に及ぼす影響は, 他船が近くを航過する場合大きくなる。すなわち自船の中心から少し外れた所に接近するような他船 (衝突の恐れの高い他船) が最接近時間に近づいた時, ベクトル解析に大きな影響を及ぼすことが判明した。

3. 方位測定誤差の実験観測による推定

さて図 1 の測定点 A を使う測定方法において, 方位理論誤差は今まで言われている方位測定誤差に比べ小さいことが判った。そこで方位測定誤差 (主として偶然誤差) を実験観測により求めてみた。実験は東京商船大学の練習船汐路丸を使い昭和 56 年 7 月 22, 23, 29 日に主として浦賀水道航行船について行った。図 4 は実験により求めたレーダ情報をもとに作成した航跡図である。図の中央プラス記号は汐路丸の位置であり, 汐路丸はこの地点で錨泊している。観測では, 同一他船について 1 分毎にレーダによる方位と距離, それに六分儀による方位変化量 (単位時間方位変化量) を測定した。測定数は全部で 226 であった。データの解析は, 六分儀による方位変化測定値を真値とし, 同一時間のレーダによる方位変化測定値との差を方位測定誤差とした。図 5 は単位時間方位変化量を横軸にして, 方位測定誤差 (単位: 度) をプロットしたものである。これにより若干の例を除けばレーダ観測者が映像の方位変化に十分追従した事が判る。すなわち, レーダ観測データには観測者の追従遅れはほと

図4 観測船航跡図
(自船中心 5N. M. 範囲)

図5 単位時間方位変化量による方位測定誤差の分布

んどなかった。次に方位測定誤差の距離特性について求めたのが図6である。図は横軸に自船から他船までの距離(単位:海里)とし、それぞれの距離における方位測定誤差(単位:度)をプロットしたものである。これにより方位測定誤差は距離が近いほどバラツキが大きくなり、遠いほどバ

ラツキが小さい様子が判る。そこで方位測定誤差の各距離における標準偏差(σ_B)を求めると

$$\ln \sigma_B = -0.3848 - 0.1479 R \quad \dots\dots\dots(1)$$

で近似される。ここでRは他船までの距離である。これは図6の曲線で示されるものである。また他船のアスペクトによる方位測定誤差の特性については、測定数が不十分であることと、測定した他船のサイズが一定ではなく、また正確なサイズが不明であったことから今回は求めなかった。しかしながら、図6から判明したように、実験で求めた方位測定誤差の標準偏差は、最接近時間以前の方位理論誤差に比べ大きいことが判明した。

図6 距離による方位測定誤差の分布

4. 観測誤差のベクトル解析に及ぼす影響

以上理論誤差と方位測定偶然誤差について考察したが、ここでは理論誤差と偶然誤差の合成値としての観測誤差について考え、この観測誤差がベクトル解析にどのように影響するか調査した。まず距離観測誤差としては、前記の距離理論誤差に IMCO の ARPA 基準²⁾で用いられた距離偶然誤差(標準偏差20メートル)の合成値とし、方位観測誤差は、前記の方位理論誤差に3. で求めた方位測定誤差(標準偏差は式(1)による)の合成値とする。そして、他船は図2の時と同様とし図3と同様のケースについてシミュレーションを行った。図7はその結果を示すものであり、上から距離観測誤差、方位観測誤差、そして、それらの観測値のうち1分間隔の値を使って求めた相対速力誤差および相対針路誤差である。図の横軸は初期位置からの経過時間(単位:分)であり、矢印は最接近時間を示している。図の構成は図3に対応するもので、左からそれぞれケース1、2及び3の場合を示す。これにより理論誤差のみの場合に比べ観測誤差の変動はきわめてはげしいことが言える。なおこの図から次

図7 距離・方位観測誤差とベクトル解析誤差

の事が判明した。

- i) 距離観測誤差の変動は距離理論誤差に比べ大きく、最大60メートル程の変動である。また全体の変動の傾向(変化)は図3の場合と同様の事が言える。すなわち最接近距離が小さくなるほどまた相対速度が大きいくほど単位時間の変化は大きい。
 - ii) 方位観測誤差の変動は最大 $\pm 2^\circ$ 程度であり、これは方位理論誤差に比べ大きなものである。このため図3の時に認められた方位理論誤差の特質は図から直接読みとることはできない。
 - iii) 相対速度誤差は最大 ± 4 ノット程度となり、理論誤差のみの場合に比べて大きい。しかし、図3で見られた最接近時間付近の特質はここでも同様に見受けられる。すなわち航過距離が小さいほど、相対速度が大きくなるほど、最接近時間付近の相対速度誤差は大きく、大部分は正の値となる。
 - iv) 相対針路誤差は最大 $\pm 15^\circ$ 程度となり、相対速度が小さいほど大きな変動を示している。また相対速度が大きい場合、図3で見られた最短時間付近の特質がここでも見られる。すなわち理論誤差の影響が見られる。
- この結果偶然誤差は方位情報に大きく、またそのベクトル解析に及ぼす影響は相対速度についてはアスペクトが 0° あるいは 180° に近いほど大きく、相対針路については相対速度が小さいほど大きいことが判った。

5. ま と め

以上レーダによる距離及び方位の観測誤差について検討した結果、これらの誤差がベクトル解析に大きな影響を及ぼすことが判明した。このうち理論誤差の距離差Rと方位差Aについては、他船の船型、距離ならびにアスペクトが判明すれば修正可能なものである。そこで前記の実船実験の時得られたサッポロ丸(船長164メートル、船幅24メートル)の航跡について、測定点Aの航跡と、距離差R、方位差Aにより修正した点の航跡を比較してみた。図8はそれぞれの点の航跡を比較したものである。これより、測定点Aを修正した点の航跡の方が測定点Aの航跡より遠目に出ており、またなめらかになる事が判明した。

ここで今回の研究結果をまとめると

- i) 方位測定は映像中央方位を測定するのが良い。
- ii) 距離測定は映像の最短距離のみが、自船と他船の間の本当の距離となるので、この距離を測定すること。
- iii) 方位測定偶然誤差は式(1)で示されるような標準偏差を持つ値である。
- iv) 測定点Aを修正し、船体中央点の座標とするには距離差Rと方位差Aによる修正が必要である(図2参照)。
- v) 測定点Aの理論誤差のベクトル解析に及ぼす影響は、他船が最接近時間に近くなるほど大きく、また最接近距離が小さいほど大きくなる。

等である。この研究ではまだ実験観測によりデータを補充しなければならない部分(たとえば方位測定誤差のアスペクト特性)があり、また他船船体中心点の推定の精度をあげる具体的な方法の開発等残された問題がある。これらの問題については今後検討したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 今津隼馬：衝突危険度の判定と避航処置，避航操船シンポジウム，日本航海学会，昭和52年3月
- (2) Report of the Intersessional Working Group on Collision Avoidance System, IMCO NAV XXIII/3, June 1979

図8 サッポロ丸航跡図