

## 特集＜航法システム研究会＞

# 船舶用レーダーとレーダービーコンを用いた GNSSバックアップのための測位システム

山 林 潤・小 嶋 達 也・岡 田 勉・柏 卓 夫

## A Positioning System using Maritime Radar and Radar Beacons as a Backup for GNSS

Jun YAMABAYASHI、Tatsuya KOJIMA、  
Tsutomu OKADA and Takuo KASHIWA

**キーワード:** GNSS バックアップ、測位システム、レーダービーコン

### 1. はじめに

今日、GNSS(全地球航法衛星システム:Global Navigation Satellite Systems)はECDIS、AIS、オートパイロット等の多くのナビゲーションシステムの基盤技術である。その一方で、GNSS は衛星システム障害に対する脆弱性や、太陽フレアやジャミング等の妨害波に対する脆弱性が指摘されている。そのためIMOが推進するe-Navigation戦略においてもGNSSバックアップシステムの必要性が指摘されている。そこで現在、eLoran(Enhanced Loran)<sup>(1)</sup>やR-Mode(Ranging Mode)<sup>(2)</sup>等の衛星に頼らない測位システムが欧州中心に提案されている。

eLoranは、英GLA(General Lighthouse Authority)が中心となって開発されている。地域ごとのLoran補正信号を提供することでGNSSと同等の精度が得られている。グレートブリテン島東海岸沿いの7つの港(ドーバー、シアネス、ハリッジ、フェリックストー、ミドルズブラ、リース、ハンバー、アバディーン)に基地局が整備済みであり、運用が開始されている。2020年までにはブリテン諸島全域をカバーする計画とのことである。

また、R-Modeは、独WSV(German Federal Waterways and Shipping Administration)によって開発されており、現在実証実験中である。R-Modeでは、DGPS補正信号の送受信時刻差から基地局

との距離を求めて測位している。

しかしeLoranには、緊急時以外は使わない基地局を配備し、受信機およびアンテナを船舶に搭載しなければならない、という問題がある。また補正信号を提供するサーバ側のコストが比較的高く、導入・普及まで時間を要することが予想される。R-Modeでは、既存設備であるDGPS基地局を利用するため、上記のような問題はない。しかし、基地局との時刻同期、MF帯特有の時間帯で変化する複雑な伝搬路からの距離推定が難しく、eLoranに比べて測位精度が悪いという問題がある。

このような背景のもと筆者らは、レーダーとレーダービーコン(以下、レーコンと呼ぶ)を用いた測位システムを開発した。本システムの船上設備はレーダーおよびコンパスであり、普段利用しない装置を設置する必要はない。また、必要海域(例えば港入り口や輻輳地帯等)に絞ってレーコンを設置すればよいため運用も簡便である。さらに、基本的に見通し内の直接波によって測位するため比較的測位精度が良く、レーダーアンテナの鋭い指向性からジャミング等の妨害波への耐性も高いことが特徴として挙げられる。

本稿では、測位システムの概要(測位原理、システム構成等)およびイギリスでの実証実験結果について報告する。

## 2. 測位原理

本測位システムの概要を図 1 に示す。本システムでもちいるレーコンは、位置情報を送信するなど一般のレーコンとは異なる動作をするため、eRacon と呼称し区別する。同様にレーダーも通常の測距機能に加えて位置情報の復調機能を有するため eRadar と呼称する。

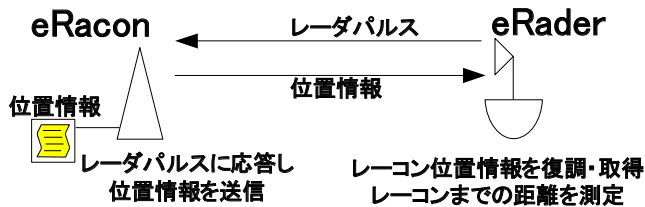


図 1 測位システム概要

レーコンは通常レーダーパルスを受けた場合、レーダーPPI 画面上でモールス符号状に見える応答波を送信している。近年のレーコンはレーダーパルスの周波数を解析し同一周波数で応答波を生成し送信(周波数アジャイルモードと呼称)している。応答波は無変調である。

本システムで使用する eRacon は、上述した通りレーダーパルスの応答波として、自身の位置情報を重畳し送信している。eRadar 側では、eRacon からの応答波を復調し eRacon の位置  $(x_n, y_n)$  を取得する機能を有する。また、レーダーの測距機能によって得た eRacon までの距離  $l_n$ ・相対方位  $\theta_n$  と、コンパスから取得した船首方位  $\theta_H$  とから、アンテナ 1 回転中に eRacon の情報を 1 つ取得できた場合は式(1)(以下、1-Rcn-Pos と呼ぶ)、eRacon の情報を 2 つ取得できた場合は式(2)(以下、2-Rcn-Pos と呼ぶ)をもちい自船位置  $(x, y)$  を求める。ここで、eRacon 位置、eRacon までの距離・相対方位のサフィックス  $n$  はアンテナ 1 回転中に取得できた複数の eRacon 応答を区別するインデックスである。

$$\begin{cases} x = x_1 - l_1 \cos(\pi/2 - \theta_H - \theta_1) \\ y = y_1 - l_1 \sin(\pi/2 - \theta_H - \theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = l_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = l_2^2 \end{cases} \quad (2)$$

上記 2 式からわかる通り、1-Rcn-Pos の測位精度はコンパスの精度に依存する。また、eRacon からの距離に比例して測位精度が低下する。一方、2-Rcn-Pos は eRadar の測距精度にのみ依存し、eRacon からの距離とは無関係である。

## 3. 実験環境およびシステム構成

### 3.1 実験環境

本測位システムの実証実験を、欧州 ACCSEAS プロジェクト<sup>(3)</sup>の一環として実施した。実験場所はグレートブリテン島南東部である(図 2)。



図 2 実験場所

eRacon は図 3 に示す通り海岸付近の灯台(海拔 37m)に計 2 台設置した(eRaconA、eRaconB)。



図 3 eRacon 設置環境

eRadar は、図 4 に示す通り GLA が保有する作業船に装備した。設置場所の制約から左舷側はマスト反射等の影響が大きい。そのため、eRacon に対し右舷を向けて測位実験をおこなった。



図 4 eRadar 設置環境

### 3.2 実験に用いたシステム構成

実験に使用した eRadar および eRacon の仕様を表 1-2 に示す。

表 1 eRadar 諸元

項目	仕様
送信出力	150 [W]
送信周波数	9350 [MHz]
送信パルス幅	0.3 [us]
送信繰返周波数	1250 [Hz]
電波型式	P0N
アンテナ回転速度	24 [rpm] (測位周期は 2.5s)

表 2 eRacon 諸元

項目	仕様
送信出力	1 [W]
変調方式	FSK
中心周波数	周波数アジャイルモード
最大周波数偏移	15 [MHz]
シンボル周期	200 [ns]
Duty Cycle	OFF (常に ACTIVE 状態)
モールス符号	‘D’ (—・・、ダッシュ部分で位置情報を変調して送信)

eRacon 応答も通常レーコンと同様のモールス符号を PPI 画面上に表示させるため、変調方式として定振幅変調方式である FSK をもちいた。また、レーコンはその応答を必ずダッシュから始めなければならないという規定があり、そのダッシュ部に位置情報を変調して送信している。

図 5 に、本実験で用いたシステム構成を示す。図中点線で囲われたブロックが既存レーダー/レーコンに対する追加ブロックである。今回、GNSS 受信機は精度評価のためと、船首方位取得のために利用した。GNSS バックアップシステム内部に GNSS を使用すると、バックアップシステムにならないが、実験船には船首方位を取得できるコンパスが無かったため GNSS で代用した。表 3 は、使用した GNSS の諸元である。

表 3 GNSS 諸元

項目	仕様
測位精度	1m (95%)以下
船首方位精度	0.02 度

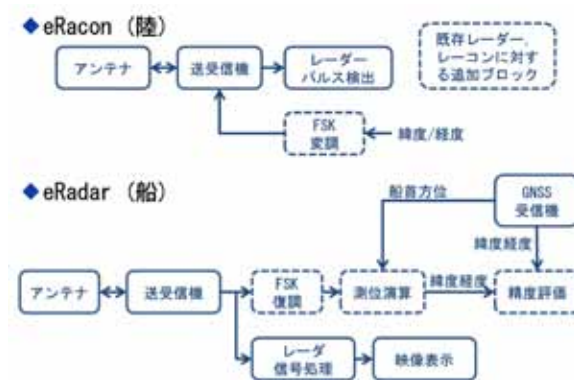


図 5 実験システム構成

図 6-8 に eRacon パルス仕様、時間波形、パケット構成を示す。図 6、7 の通り、レーダー PPI 画面上に‘D’のパターンを表示させるために、無変調パルスを送信している。また、図 8 の通り、パケットはプリアンプル部、情報部、CRC 部からなり、情報部の位置情報として、緯度経度をもちいた。さらに、レーコン応答が他のエコーをマスクする領域が小さくなるよう配慮し、緯度経度を交互に送信する方式とした。

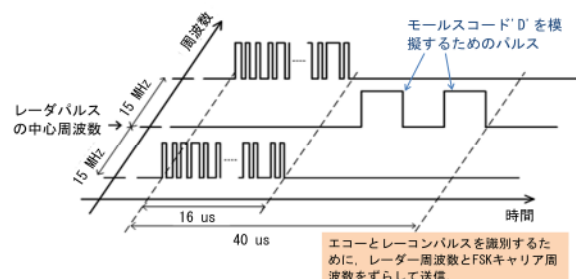


図 6 eRacon パルス仕様

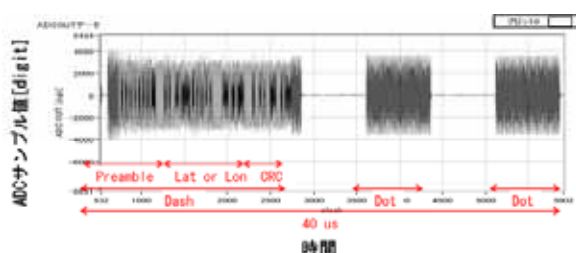


図 7 eRacon パルス時間波形

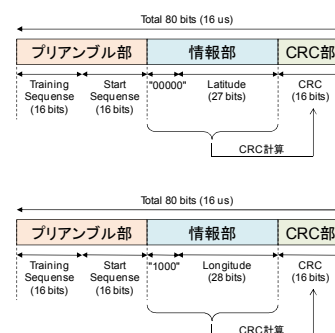


図 8 パケット構成

図 9 に、eRacon 応答の映像例を示す。ダッシュ部の輝度が少し落ちて均一ではないことがわかる。これは、ダッシュ部のみ変調されておりエコー受信帯域からずれているためである。ドット部も変調するなどすれば通常レーコンと同等の映像を得ることができると考えられる。

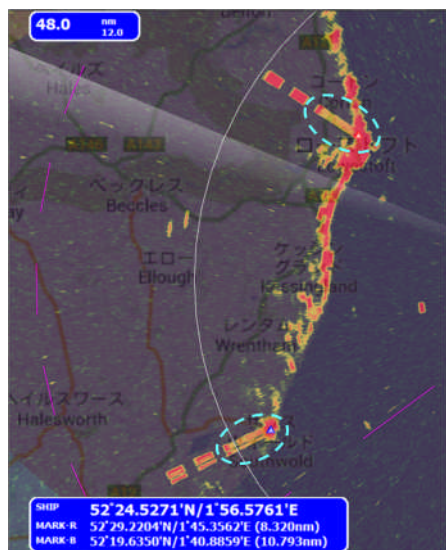


図 9 eRacon 応答波形映像例

## 4. 実験結果

### 4.1 実験方法

実験は、海上のある点付近に留まり測位する停船テストと移動しながら測位する移動テストを実施した。図 10、11 に、停船テストのデータ取得ポイントおよび移動テストの航跡を示す。

停船テストにおける各ポイントでの収録時間は約 10 分～20 分とした。アンテナ 1 回転で 1 回測位できるため、約 240 回～480 回の測位機会が得られるはずである。実際は、レーコンが応答しない場合もあるので、測位回数はそれより少なくなる。本稿では、実際に測位がおこなわれた回数を全測位機会で割った値を測位率(Availability)としている。また、測位精度は測位をおこなった際に同時に取得した GNSS 出力を真値とし測位結果の 95%が含まれる範囲として測位精度(Accuracy)を評価した。

移動テストでは、実際の航海を模擬するために沿岸から約 8NM 沖を、沿岸におおむね並行に船を走らせながらデータ収録した。データ収録時間は 1st Pass が約 2 時間(平均速度は約 16kn)、2nd Pass が約 1 時間半(平均速度は約 14kn)であった。

なお、実験中、風は微風(5kn 以下と推測)、海況は風であった。

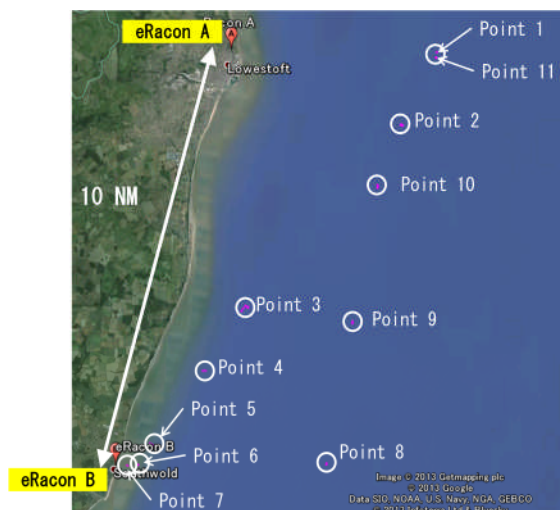


図 10 停船テストポイント

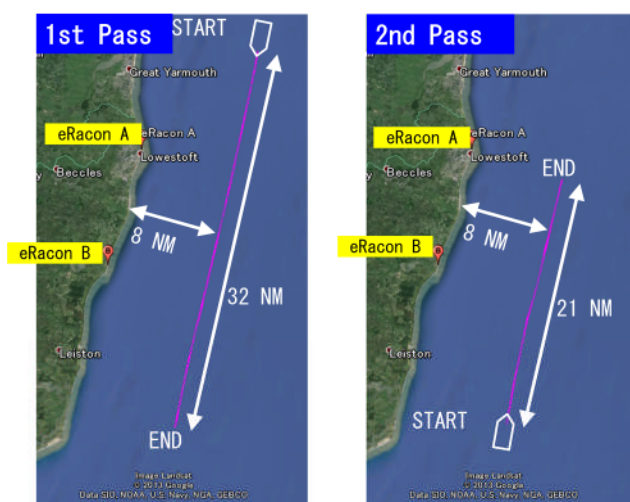


図 11 移動テスト航跡

### 4.2 実験結果

#### 4.2.1 停船テスト結果

図 12 に全実験ポイントの Accuracy と Availability の評価結果をグラフで示す。

1-Rcn-Pos(A)、1-Rcn-Pos(B) は、それぞれ eRaconA または eRaconB から得られた情報によって測位した結果を表す。また、2-Rcn-Pos は 2 つのレーコンから得られた情報によって測位した結果を表す。

“Total Perf.”は、1-Rcn-Pos と 2-Rcn-Pos を統合した性能である。“Total Perf.”の Accuracy は、eRacon A と B の両方から応答パルスが取得できたスキャンでは 2-Rcn-Pos の結果を採用し、片方のみから応答パルスを取得したスキャンでは 1-Rcn-Pos の結果を採用して精度評価したものである。また、“Total Perf.”の Availability は、eRacon A と B の少なくとも片方の応答パルスを取得できたスキャン



では「測位成功」とし、いずれからも応答パルスを取得できなかったスキャンでは「測位失敗」としている。

2-Rcn-Pos の Accuracy は全実験ポイントを通して 7m 以下であり、GNSS 単独測位に匹敵する精度が得られていることがわかる。また、eRacon A を設置した灯台の南側に比較的高い木があったため、Point 3~7 では eRacon A の応答頻度が低い。eRacon A の位置から Point 3~7 付近が木で遮蔽されて視界が悪いことは、eRacon A 設置位置から目視で確認できた。

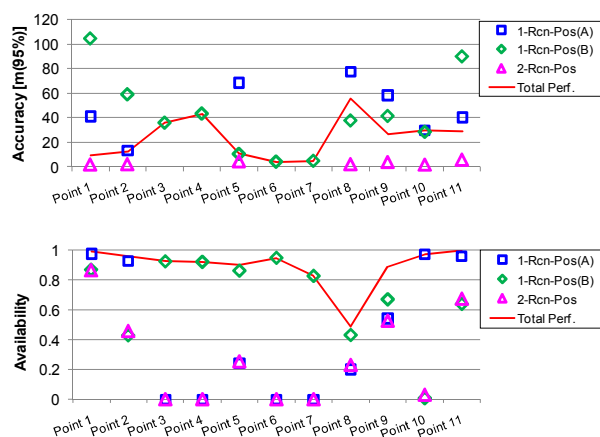


図 12 全実験ポイントの Accuracy(上)と Availability(下)

図 13 は 1-Rcn-Pos の評価結果だけを抜き出し、eRacon までの距離を横軸にとったものである。

2 章でも述べた通り、原理的には 1-Rcn-Pos の測位精度は eRacon までの距離に比例する。そこで、各プロット値から最小二乗法をもちいたフィッティング直線を Accuracy グラフ上に点線で示した。eRacon までの距離 1NM あたり 7.4m 測位精度が低下していることがわかる。

Availability のグラフに重ねた点線は、実験仕様値からとめたハイトパターンである。前述したように、Point 3~7 からは灯台付近の木によって eRacon A が遮蔽されていた。これらのデータを度外視すれば、ハイトパターンが示す電力低下距離と Availability が低下する距離が概ね一致していることが分かる。すなわち本測位システムではマルチパス(直接波+海面反射波)による Availability の低下が顕著である。

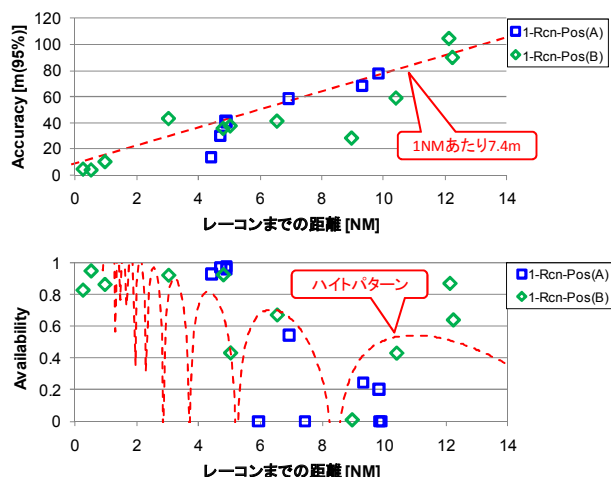


図 13 1-Rcn-Pos の Accuracy(上)と Availability(下)の、距離との関係

#### 4.2.2 移動テスト実験結果

表 3-4 は、それぞれ移動テストの 1st Pass および 2nd Pass の測位結果である。

表 3 移動テスト 1st Pass 測位結果

	Accuracy [m(95%)]	Availability[%]
1-Rcn-Pos(A)	80	42
1-Rcn-Pos(B)	77	41
2-Rcn-Pos	4.9	23
Total Perf.	70	63

表 4 移動テスト 2nd Pass 測位結果

	Accuracy [m(95%)]	Availability[%]
1-Rcn-Pos(A)	535	25
1-Rcn-Pos(B)	-	0
2-Rcn-Pos	-	0
Total Perf.	535	25

1st Pass では、停船テスト同様、2-Rcn-Pos の Accuracy は 4.9m と GNSS 単独測位に匹敵する。また、Total Perf. の Accuracy も 70m であり、GNSS バックアップとして十分機能すると考えられる。一方、Availability は 63% と低い。実験中、最大 5 分間の測位不能期間があり Availability に影響を与えている。この測位不能期間はマルチパスに起因すると推測される。

2nd Pass では、Accuracy、Availability とともに 1st Pass よりも著しく悪い。これは、3.1 節でも述べた通り eRadar の装備環境に起因する。左舷側のマストなどの船上構造物が遮蔽となっており、Accuracy、Availability に影響したと考えられる。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では、eRadar と eRacon を利用した測位システムについて、システム構成およびイギリスでの実験結果について述べた。

Accuracy は、1-Rcn-Pos では距離に概ね比例し、1 NM あたり 7~8m(95%)であった。また、2-Rcn-Pos では全実験を通して、7m(95%) 以下であった。Availability は良い環境では 90%以上であった。ただし、マルチパス(直接波+海面反射波)の影響で大きく低下することが確認できた。

今後は、既存レーコン応答との互換性維持のためのパルス仕様の再検討や、シンガポールや東京

湾といった幅狭海域における eRacon の応答性の確認が必要である。

## 参考文献

- (1) Enhanced Loran Definition Document、International Loran Association、2007.10.
- (2) Gregory Jhonson and Peter Swaszek : Feasibility Study of R-Mode using MF DGPS Transmissions、ACCSEAS、2014.11.
- (3) ACCSEAS : トップページ、<http://www.accseas.eu/>

---

平成 28 年 2 月 5 日投稿

やまばやし じゅん

**山 林 潤** 古野電気株式会社 技術研究所研究部 ハードウェア・システム技術研究室  
(〒662-8580 兵庫県西宮市芦原町 9 番 52 号)  
E-mail : jun.yamabayashi.mn@furuno.co.jp

こじま たつや

**小嶋 達也** 古野電気株式会社 (現在、株式会社 MTI 出向中)  
(〒662-8580 兵庫県西宮市芦原町 9 番 52 号)  
E-mail : tatsuya.kojima@furuno.co.jp

おかだ つとむ

**岡田 勉** 古野電気株式会社 技術研究所研究部 ハードウェア・システム技術研究室  
(〒662-8580 兵庫県西宮市芦原町 9 番 52 号)  
E-mail : tsutomu.okada@furuno.co.jp

かしわ たくお

**柏 卓夫** 古野電気株式会社 技術研究所研究部  
(〒662-8580 兵庫県西宮市芦原町 9 番 52 号)  
E-mail : takuo.kashiwa@furuno.co.jp