

WSN端末を用いた船舶衝突警報システムの提案(無線分散ネットワーク,一般)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-10-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岡村, 俊亮, 椋本, 介士, 和田, 忠浩 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/7944

WSN 端末を用いた船舶衝突警報システムの提案

岡村 俊亮[†] 椋本 介士[†] 和田 忠浩[†]

[†] 静岡大学工学部 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1
E-mail: †{f0130096,tekmuku,tetwada}@ipc.shizuoka.ac.jp

あらまし 船舶衝突警報システムは、船舶が、岸壁或いは他の船舶に異常接近した際に警報を発生し、操舵者に衝突回避を促すシステムである。本稿では、WSN (Wireless Sensor Network) 端末の RSSI(Received Signal Strength Indicator) 測定機能を利用した小型船向けの安価な衝突警報システムを提案する。また、動的に変化する対象物との距離を、RSSI 系列から漸近的に推定するためのアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムを用いた衝突警報システムの性能は、水上実験結果から得られた電波伝搬モデルに基づくシミュレーションにより評価される。

キーワード 船舶衝突警報システム, WSN 端末, RSSI 測定, 2 波電波伝搬モデル, 推定フィルタ

Proposal of a new ship collision alert system using WSN terminals

Shunsuke OKAMURA[†], Kaiji MUKUMOTO[†], and Tadahiro WADA[†]

[†] Shizuoka University Johoku 3-5-1, Naka-ku, Shizuoka, 432-8561 Japan
E-mail: †{f0130096,tekmuku,tetwada}@ipc.shizuoka.ac.jp

Abstract Ship collision alert system is a system that raises an alarm and urges steersman to avoid collision when the ship abnormally closes to another ship or quay. In this paper, we propose a new low-cost collision alert system for small ships or boats using the RSSI measurement function of WSN nodes. We also propose an algorithm to estimate the distance to the object using a series of RSSI values. Performance of the algorithm is evaluated by simulations based on a propagation model obtained by aquatic experiments.

Key words Boat collision alert system, WSN node, RSSI-based distance measurement, Two-ray propagation model, Estimation filter

1. ま え が き

船舶衝突警報システムは、船舶が、岸壁或いは他の船舶に異常接近した際に警報を発生し、操舵者に衝突回避を促すシステムである。既存の衝突回避支援システムとしては、レーダを利用した ARPA (Automatic Radar Plotting Aid) システムや GPS(Global Positioning System) を利用した AIS (Automatic Identification System) 及び簡易 AIS が知られている [1] [2]。しかし、ARPA は、レーダ電波により他船を補足追尾するため、初期補足誤差、変針変速時誤差、目標船の誤認といった問題がある。AIS は、GPS による自船の位置情報、識別符号、針路情報などを互いに交換することで、衝突回避支援を行うシステムであり、正確な船舶認識と高精度の測位が可能であるが、VHF 電波による TDMA(Time Division Multiple Access) 方式で情報を交換しているために、即応性が充分とは言えない。また、広範囲に自船の情報を放送することになるので、漁場を知られたくない漁船などが、故意に停波して航行するといった問題が指摘されている。加えて、両システムとも、価格面の問

題や電波法上の免許が必要な点などが、小型船への普及の妨げとなっている。

一方、近年、WSN(Wireless Sensor Network) 端末を利用したアドホックネットワークが注目され、様々な分野への応用が期待されている。船舶通信においても、遠洋へ航行しない小型船や湖などの限られた水域で活動する船舶には、AIS のような遠距離通信システムよりも WSN 端末による通信システムの方が適している場合も考えられる。本稿では、WSN 端末の基本機能である受信信号電力強度 (RSSI : Received Signal Strength Indicator) 測定機能を利用した簡易な船舶衝突警報システムを提案し、その基本性能を示す。以下では、この提案システムを BCAS(Boat Collision Alert System) と呼ぶ。BCAS には、ARPA や AIS に比べ次のような利点がある。

1. パケットを利用するため、ARPA のような目標物の誤認がない。
2. 直接 CDMA でパケット交換を行うため、AIS のような情報伝達遅延がない。

3. WSN 端末を利用するため、設備が小型軽量、低消費電力、低価格である。
4. 無線局免許を必要としない。
5. RSSI 測距を利用するため、測距精度は低いが、確実である。
6. 小電力マイクロ波を利用するため、電波の到達範囲を限定できる。
7. GPS などの付加的な設備を必要としない。
8. 船舶間通信により、オプションで GPS 情報、針路情報などの交換も可能である。

以下、本稿は次のように構成する。2.において、BCASの具体的な提案を行う。3.では、直接波と水面反射波からなる2波電波伝搬モデルに基づいて、距離-RSSI特性の理論式を導出し、さらに散乱波や周辺雑音の影響によるRSSI値の変動についても理論的考察を行う。また、導出された理論式が実際の水上実験結果とよく一致することを示す。4.では、RSSI値の時系列から現在の対象物までの距離と衝突残余時間を推定するためのアルゴリズムを提案する。5.では、3.で示した電波伝搬モデルに基づくシミュレーションにより、推定アルゴリズムの性能を評価する。

2. BCASの提案

ここでは、本稿で提案する衝突警報システム(BCAS)の基本動作を概説する。

1. 船舶或いは岸壁に設置されたWSN端末(以下、端末と呼ぶ)は、通常受信状態にあり、全ての packets を受信する。
2. 各端末は、packetsの送信に先立って必ずキャリア(受信信号エネルギー)観測を行い、他の端末の送信がないことを確認してpacketsの送信を行う。キャリア検出された場合はランダム遅延後に送信を試みる。
3. 各端末は、 T_P 秒間隔(例えば1秒間隔)でプローブpacketsの送信を試みる。プローブpacketsには、必須項目として、自船の認識番号、送信電力、アンテナ高、アンテナ利得を含める。また、オプションとして、GPSによる自船の位置情報、針路情報等を含めることもできるとする。
4. 各端末は、受信されたpacketsのRSSI値またはオプション情報を用いて、対象物との距離、衝突残余時間を推定し、衝突の恐れがあると判定した場合には警報を発して操舵者に回避を促す。また、プローブpackets間隔よりも短い T_A 秒間隔(例えば0.1秒間隔)で警告packetsを送信する。警告packetsには、自船認識番号など通常のプローブpackets情報に加えて、相手船の認識番号、受信RSSI値などを含める。
5. 自局宛に警報packetsを受信した端末は、自局の推定結果にかかわらず警報を発する。
6. 衝突が回避された場合は、警報を停止しプローブpackets状態に戻る。

なお、何らかのアドホックネットワークとBCASを共用する場合には、プローブpacketsはアドホックネットワークの制

御packetsとして利用することも、また逆にアドホックネットワークの各種packetsをプローブpacketsとして利用することも考えられる。

以下、本稿では、ほぼ T_P 秒間隔で送信されるプローブpacketsのRSSI値を利用した距離推定方法とその性能評価を行い、BCASの基本的な性能を示す。

3. 水上での電波伝搬

3.1 2波電波伝搬モデル

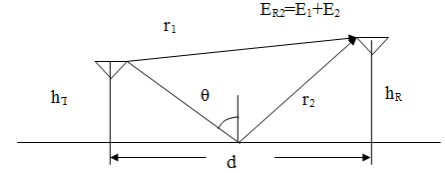


図1 2波電波伝搬モデル

水上には、通常大きな遮蔽物がないため、基本的な電波伝搬モデルとして、図1のような2波モデルを適用することができる[3]。即ち、受信点における電界強度 E_{R2} は、直接波の電界強度 E_1 と反射波の電界強度 E_2 の和として求められる。ここで、図中の r_1 [m]は直接波の経路長、 r_2 は反射波の経路長、 d [m]は送受信間の距離、 h_T, h_R [m]は送受信アンテナ高、 θ は入射角である。WSNに広く利用されている2.4GHz帯電波に対しては、大気による減衰や降雨減衰は無視できることが知られているので、 E_1 は、第一フレネルゾーン内に障害物がないことを条件として、自由空間伝搬における距離 r_1 の点の電界強度で近似される。一方、 E_2 は、送信点と受信鏡像点で形成される第一フレネルゾーンが交差する反射面が平坦であるとみなせるとき、自由空間伝搬における距離 r_2 の点の電界強度と反射係数の積で近似される。従って、 $h_T, h_R \ll d$ とし、アンテナの垂直方向の指向性の変化を無視できるとすると、 E_{R2} は、よく知られた2波モデルの理論式

$$E_{R2} = E_0 \left(1 + R(\theta) e^{-j\beta(r_2 - r_1)} \right) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $R(\theta)$ は反射係数、 $\beta (= 2\pi/\lambda)$ は位相定数、 λ は電波の波長である。また、 E_0 は自由空間伝搬における距離 d の点の電界強度である。自由空間伝搬における受信信号電力 P_{RF} は、送信電力を P_T 、送受信アンテナ利得を G_T, G_R とすると、フリスの伝達公式

$$P_{RF} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R P_T \quad (2)$$

で与えられ、受信電力は受信点の電界強度の絶対値の2乗に比例するので、2波モデルにおける受信電力 P_{R2} は、

$$\begin{aligned} P_{R2} &= \frac{|E_{R2}|^2}{|E_0|^2} P_{RF} \\ &= \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R P_T |1 + R(\theta) e^{-j\beta(r_2 - r_1)}|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられる。

なお、反射面が平坦と見なせるならば、反射係数 $R(\theta)$ は、入射角 θ が90度に近づくと、偏波や屈折率に関係なく-1に漸

近することが知られている。BCAS においては、空気と水の屈折率が十分に大きい上に、通常 $h_T, h_R \ll d$ が成り立つので、 $\theta \simeq 90^\circ$ であるから、 $R(\theta) \simeq -1$ とすることができる。

水面に波浪がある場合、反射面を平坦と見なせるか否かは、レイリーの判定基準 (Rayleigh criterion)

$$\sigma_W < \lambda / (8 \cos \theta) \quad (4)$$

で判定できる。ここで、 σ_W は、波の起伏の標準偏差である。この基準が満たされるとき、反射波のコヒーレント成分が卓越し、水面をほぼ平坦と見なすことができる。また、その場合の反射係数は、静穏時の反射係数に、修正係数

$$\rho_W = \exp \left\{ -8 \left(\frac{\pi \sigma_W \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

を掛けたものとなる [4]。しかし、BCAS においては $\theta \simeq 90^\circ$ であるので、この場合についても $R(\theta) \simeq -1$ として良いことがわかる。ただし、水面の変化に伴って受信電力が変動する可能性があり、この点は後で考察する。

3.2 2波+散乱波モデル

BCAS の受信信号電力は、実際には、直接波と水面反射波の他に、アンテナ周辺の構造物や水面の波浪などからの散乱波の影響を受けて変動すると考えられる。そこでここでは、前述の2波モデルに、 m 個の散乱波を加えた伝送路モデルを考える。第 j ($j=1 \sim m$) 散乱波による受信点の電界強度 E_{sj} は、直接波の α_j 倍の強度を持ち、位相が ϕ_j 進んでいるとすると、

$$E_{sj} = \alpha_j E_0 \exp(j\phi_j) \quad (6)$$

と表すことができる。このとき、受信点における合成の電界強度 E_{RA} は、

$$E_{RA} = E_{R2} + \sum_{j=1}^m E_{sj} \quad (7)$$

で与えられる。上式の第2項は、様々な振幅および位相の散乱波の合成であるので、 m が十分に大きければ、レイリー波と考えることができる。即ち、

$$\sum_{j=1}^m E_{sj} = E_0 (X_S + jY_S) \quad (8)$$

とおくと、 X_S 及び Y_S は、平均0で同一の分散を持つ互いに独立なガウス分布に従うとすることができる。この時の受信信号電力は、 $R(\theta) = -1$ とすると、

$$P_R = \frac{P_{RF} |E_{RA}|^2}{|E_0|^2} = P_{RF} |1 - e^{-j\beta(r_2 - r_1)} + X_S + jY_S|^2 \quad (9)$$

で求められる。ここで、

$$1 - e^{-j\beta(r_2 - r_1)} = A (\cos \psi + j \sin \psi) \quad (10)$$

とおき、 X_S 及び Y_S の分散を σ_S^2 とすると、 $|1 - e^{-j\beta(r_2 - r_1)} + X_S + jY_S|$ の確率密度関数 (p.d.f.) は、仲上-ライス分布

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma_S^2} \exp \left\{ -\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma_S^2} \right\} I_0 \left(\frac{Ar}{\sigma_S^2} \right) \quad (11)$$

となる。ここで、 $I_0(\cdot)$ は第一種0次変形ベッセル関数である。さらに、上式において、 $p = P_{RF} \cdot r^2$ と変数変換することにより、 P_R の p.d.f. は、

$$f_p(p) = \frac{1}{2P_{RF}\sigma_S^2} \exp \left\{ -\frac{(p + P_{RF}A^2)}{2P_{RF}\sigma_S^2} \right\} I_0 \left(\frac{A}{\sigma_S^2} \sqrt{\frac{p}{P_{RF}}} \right) \quad (12)$$

と求められる。なお、この式は、自由度2の非心カイ2乗分布の p.d.f. を表すが、これは、式(9)が2つのガウス変数の2乗和となることから確かめられる。2波+散乱波モデルにおける平均受信信号電力は、式(9)より、

$$\bar{P}_R = P_{RF} |1 - e^{-j\beta(r_2 - r_1)}|^2 + 2P_{RF}\sigma_S^2 \quad (13)$$

で与えられる。上式の第1項は直接波と水面反射波による受信電力を、第2項は散乱波による受信電力を表す。通常、仲上-ライスフェージングの解析では、 K 因子と呼ばれる定常波と散乱波の電力比をパラメータとして議論が進められるが、本稿の以下の議論では、直接波と散乱波の電力比 $\kappa = 1/(2\sigma_S^2)$ をパラメータとして用いる。これは、 κ が主にアンテナ周辺の構造物や水面の状態に依存し、送受信局間距離による変化はあまり大きくないと考えられるからである。 κ を用いて、式(13)を書き直すと、

$$\bar{P}_R = P_{RF} (|1 - e^{-j\beta(r_2 - r_1)}|^2 + 1/\kappa) \quad (14)$$

となる。なお、実際に RSSI として観測される受信電力は、上述の受信信号電力と雑音電力の和である。従って、受信機周辺の雑音や内部雑音が無視できない場合には、それらの雑音の平均電力を \bar{P}_n とすると、平均 RSSI 値は、

$$\bar{P}_{RSSI} = \bar{P}_R + \bar{P}_n \quad (15)$$

となる。

3.3 実験

筆者らは、これまで WSN 端末の距離-RSSI 特性を調査するため、陸上及び水上で様々な実験を行ってきた。本稿では、それらの内、静岡県浜名湖において行った実験結果をもとに、前節の2波+散乱波モデルの有効性を示す。

3.3.1 実験概要

この実験には、WSN 端末として米国 Crossbow Technology 社の IRIS Mote [6] (以下、Mote 端末と呼ぶ) を2台使用した。一方の Mote 端末を移動局として水上のボートに設置し、他方を固定局として水際の陸上に設置した (図2)。なお、この実験では片方を陸上固定局としたが、実際の BCAS の主な使用環境では、両 Mote 端末とも船舶に設置される。また、簡単化のために、移動局のみがプローブパケットを一定間隔 ($T_p = 1[s]$) で送信し、それを固定局で受信して RSSI 値を記録するものとした。移動局は、固定局近くの湖岸から数百メートル遠方の湖上まで、ほぼ直線的に往復させた。移動局には GPS も設置し、1秒間隔で座標を記録した。実験日の天候は曇り、ほぼ無風で、湖面の状態は非常に穏やかであった。

実験に使用した Mote 端末の主な諸元は、送信電力 $P_T = 2[mW]$ 、送受信アンテナ利得 $G_T = G_R = 2[dBi]$ 。使用周波数は $f = 2.475[GHz]$ である。測定される RSSI 値は、 $128[\mu s]$ 間の受信電力を平均したもので、最小値は $-91[dBm]$ 、分解能 $1[dB]$ であり、 $\pm 5[dB]$ の定常偏差を含むとされている [7]。

3.3.2 実験結果

実験はアンテナ高を $0.1[m]$ 間隔で $1.5 \sim 1.9[m]$ と変化させて



図2 移動局(左), 固定局(右)

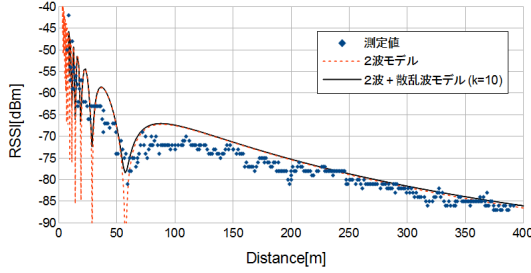


図3 距離-RSSI 特性(実験結果)

行った. 実験結果の典型例として, 送受信アンテナ高を 1.7[m] としてボートを遠方から湖岸に近づけた際の測定結果を図 3 に示す. 横軸は, GPS の座標から算出した移動局-固定局間の距離であり, 縦軸はその距離において移動局から送信されたプローブパケットの固定局での RSSI 値である. ただし, 事前の実験により, 本実験に使用した Mote 端末の RSSI 表示に約 4dB の定常偏差があることが確認されていたため, 図中の測定値 (・印) は, 実測値に 4dB を加えたものを示した. 図中の実線および破線は, それぞれ 2 波+散乱波モデルの理論式 (14) および 2 波モデルの理論式 (3) から求めた理論曲線である. また, 固定局のアンテナ高 h_R は設置場所の水面からの高さを考慮して 2.0[m] とした. なお, 2 波+散乱波モデルにおける κ は, 10 とし, 雑音電力は, -91dBm 以下であったため考慮しなかった.

この図から, 2 波+散乱波モデルによる理論値は, 測定結果を良く近似していることが分かる. 特に, 距離 50m 付近の干渉による RSSI 値の落ち込みは, 2 波モデルでは測定結果に比べて大き過ぎるのに対して, 2 波+散乱波モデルではほぼ測定結果と一致していることが分かる. なお, Mote 端末の RSSI 表示値は, 受信電力を正確に表しているわけではなく, 様々な誤差が含まれている. 本実験においては, 定常偏差については調整を行ったが, 受信電力-RSSI 値の非線形性の影響は考慮しなかった [8]. 距離 100[m] 付近の誤差などは, そうした測定結果の誤差によるものかもしれない.

この水上実験における他の実験結果に対しても, 2 波+散乱波モデルによる理論値は, 図 3 とほぼ同様な良い近似を示した. κ の値は, 水面の状態やアンテナ周辺の物体の影響により決まるものと考えられるが, 本実験においては $\kappa = 10$ 程度が実験結果と良く一致した.

4. 距離推定法

4.1 RSSI-距離変換方法

ここでは, 測定された 1 つの RSSI 値から距離推定値を求める方法を検討する. 図 3 で示されているように, 実際の距

離-RSSI 特性は単調減少関数ではない. そのため, 例えば 2 波モデルの理論式 (3) を用いて距離推定値を算出しようとする, 1 つの RSSI 値に対して複数の距離が対応する. 2 波+散乱波モデルの理論式 (14) を用いれば, 低 RSSI 値は 1 つの距離に対応するが, RSSI 値が大きくなると, やはり対応する距離が複数になる. この問題への対応策として, 距離-RSSI 特性を両対数グラフ上の折れ線で近似するという方法が知られている [3]. 例えば, 筆者らは以前に, 近距離に対してはフリスの伝達公式 (2) を, 遠距離に対しては 2 波モデルの理論式 (3) の近似式を用いて, 距離 d と受信信号電力 P_R の関係を

$$P_R = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R P_T & d \leq \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda} \\ \left(\frac{h_T h_R}{d^4}\right)^2 G_T G_R P_T & d > \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda} \end{cases} \quad (16)$$

と近似し,

$$\hat{d} = \begin{cases} \frac{\lambda}{4\pi} \left(\frac{G_T G_R P_T}{P_R}\right)^{\frac{1}{2}} & P_R \geq \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^4 \frac{G_T G_R P_T}{(h_T h_R)^2} \\ \sqrt{h_T h_R} \left(\frac{G_T G_R P_T}{P_R}\right)^{\frac{1}{4}} & P_R < \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^4 \frac{G_T G_R P_T}{(h_T h_R)^2} \end{cases} \quad (17)$$

を用いて, 距離推定値 \hat{d} を算出するという方法を提案した [5].

しかし, この方法では, 境界値 (ブレイクポイント^(注1)) $4\pi h_T h_R / \lambda$ より近い位置で, 干渉により RSSI が小さな値を示した場合に大きな誤差を生じてしまう. しかもこの誤差は, 距離を大きく見積もることになるので, 特に BCAS においては致命的な問題であった.

ところで, BCAS においては, 距離推定は 1 つの RSSI 値のみから行う必要はなく, 遠方から近づいてくる船舶が送信する一連のパケットの受信電力を総合的に解析して, 距離推定を行う方法が考えられる. そこで, 本稿では BCAS の距離推定方法として, 次のような方法を提案する.

1. 2 波+散乱波モデルの理論式を用いて, 測定された RSSI 値に対応する距離を求める. 遠方では, RSSI 値は距離と 1 対 1 に対応するので, 対応する距離は 1 つであるが, RSSI 値が増加すると対応する距離は複数個となる. 対応する距離が 1 つの場合, それを 1 次推定値とする.
2. 過去の 1 次推定値をもとに, 以下で提案する推定法 (漸近最小 2 乗フィルタ) を用いて, 対象船との相対速度を推定し, 現在の距離を予測する.
3. 対象船との最大加速度を仮定し, 現在の距離として取り得る値の可能な範囲を決める.
4. その範囲内に現在の RSSI 値に対応する距離が 1 つの場合, それを 1 次推定値とする. 範囲内に対応する距離が複数個あった場合は, 予測値に最も近いものを 1 次推定値とする. 範囲内に RSSI 値に対応する距離がなかった場合は, その RSSI 値に最も近い値となる距離を 1 次推定値とする.
5. 2. に戻り, 速度の推定及び距離の予測を更新する.

4.2 漸近最小二乗フィルタ法

n 個の観測結果の組 $\{(x_i, y_i) | i = 1 \sim n\}$ が与えられた時,

(注1): ブレイクポイントは, 近距離の距離-RSSI 特性の近似法により異なった値になる. 文献 [3] では, $4h_T h_R / \lambda$ をブレイクポイントとしている.

x と y にある関数関係 $y = f(x)$ があると仮定して、そのパラメータを求める一般的な方法に最小 2 乗法がある。この最小 2 乗法では、誤差の 2 乗和を評価関数として、それが最小となるように、 $f(x)$ のパラメータが決定される。

BCAS においては、 x_i はパケット到着時刻を、 y_i はその RSSI 値から求められた 1 次推定距離を表す。相手船舶の動きは決まっていないが、短期間では $f(x)$ は 1 次関数、

$$f(x) = ax + b \quad (18)$$

で近似できるとし、評価関数として、

$$J = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \alpha^{x_n - x_i} \quad (19)$$

を用いる。ただし、 $0 < \alpha \leq 1$ であり、これにより、現在に近い観測結果ほど大きな重みを付けて評価される。式 (19) を a 及び b について微分し、0 と置くことにより、 J を最大にする最適値 $a(n)$ 及び $b(n)$ は、

$$a(n) = \frac{S_{xy}(n) - S_x(n)S_y(n)}{S_{xx}(n) - S_x^2(n)} \quad (20)$$

$$b(n) = \frac{S_{xx}(n)S_y(n) - S_x(n)S_{xy}(n)}{S_{xx}(n) - S_x^2(n)} \quad (21)$$

ただし、

$$\begin{aligned} S_x(n) &= c(n) \sum_{i=1}^n x_i \alpha^{-x_i}, & S_y(n) &= c(n) \sum_{i=1}^n y_i \alpha^{-x_i} \\ S_{xx}(n) &= c(n) \sum_{i=1}^n x_i^2 \alpha^{-x_i}, & S_{xy}(n) &= c(n) \sum_{i=1}^n x_i y_i \alpha^{-x_i} \\ c(n) &= 1 / \sum_{i=1}^n \alpha^{-x_i} \end{aligned}$$

と求められる。また、 $S_x(n), S_y(n), S_{xx}(n), S_{xy}(n)$ に関して、漸化式

$$\begin{aligned} S_x(n) &= S_x(n-1) + \beta(n) \{x_n - S_x(n-1)\} \\ S_y(n) &= S_y(n-1) + \beta(n) \{y_n - S_y(n-1)\} \\ S_{xx}(n) &= S_{xx}(n-1) + \beta(n) \{x_n^2 - S_{xx}(n-1)\} \\ S_{xy}(n) &= S_{xy}(n-1) + \beta(n) \{x_n y_n - S_{xy}(n-1)\} \end{aligned}$$

ただし、

$$\beta(n) = \alpha^{-x_n} / \sum_{i=1}^n \alpha^{-x_i}$$

が成り立つ。このとき、時刻 $t(x_n \leq t < x_{n+1})$ における衝突残余時間 $T_C(t)$ は、

$$\hat{T}_C(t) = -b(n)/a(n) - t \quad (22)$$

と推定される。

4.3 シミュレーション結果

3.3 の実験結果より、水上の電波伝搬特性は、3.2 の 2 波 + 散乱波モデルにより記述可能であることが示された。そこでここでは、2 波 + 散乱波モデルに基づくシミュレーションにより、上述の距離推定アルゴリズムの性能を評価する。

最初に、相手船舶が一定速度で接近してくる場合を考える。初期距離 $d_0 = 400$ [m]、速度 $v = 10$ [m/s] とし、他のパラメータは図 3 と同じ、即ち、アンテナ高 $h_T = 1.7$ [m]、 $h_R = 2.0$ [m]、周波数 $f = 2.475$ [GHz]、送受信アンテナ利得 $G_T = G_R = 2$ [dBi] とした。図 4 に、この条件で距離-RSSI 特性をシミュレーションした結果の一例を示す。横軸は端末間距離 d [m]、縦軸は RSSI

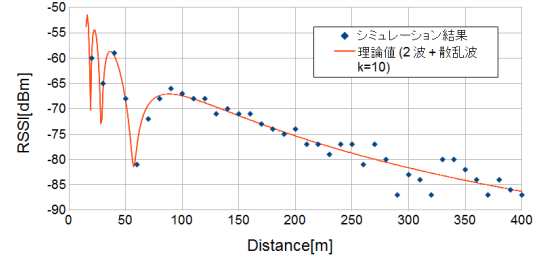


図 4 距離-RSSI 特性の例 (等速運動)

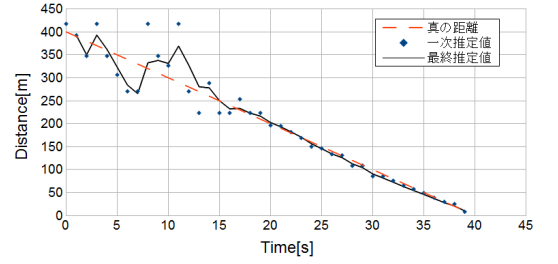


図 5 経過時間-一次推定距離の例 (等速運動)

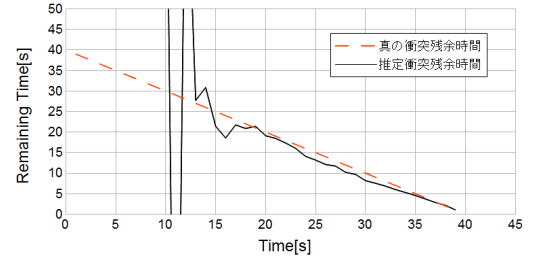


図 6 経過時間-推定衝突残余時間の例 (等速運動)

値である。また、図中の実線は 2 波 + 散乱波モデルの理論値である。

図 4 のシミュレーション結果に対して 4.1 で示した距離推定アルゴリズムを適用し、推定距離を求めた結果を図 5 に、推定衝突残余時間を求めた結果を図 6 に示す。図 5 の縦軸は推定距離、図 6 の縦軸は推定衝突残余時間、両図の横軸はシミュレーション開始からの経過時間である。図 5、6 中の破線は距離及び衝突残余時間の真値、・印は 4.1 に示したアルゴリズムを適用して求めた一次推定値、実線は 4.2 に示した漸近最小 2 乗フィルタ法を用いて求めた最終推定値及び推定衝突残余時間である。なお、今回のシミュレーションでは 4.2 中の重み α は 0.8 に設定した。図 5 を見ると、バラつきがある距離-RSSI 特性に対しても、ある程度真値に近い推定距離が得られている。また、図 6 から、推定開始から十分時間が経過していれば、かなり正確な推定衝突残余時間が得られることもわかる。

次に、相手船舶が加速しながら近づいてくる場合を考える。速度 v [m/s] (初期速度 $v_0 = 0$) に一定加速度 $a = 0.25$ [m/s²] が加わると仮定し、それ以外は等速運動時と同じに設定し、シミュレーションを行った。この条件でシミュレーションを行った結果を図 7 に示す。横軸は端末間距離、縦軸は RSSI 値である。

図 7 のシミュレーション結果に対して 4.1 で示した距離推定アルゴリズムを適用し、推定距離を得た結果を図 8 に、推定衝突残余時間を得た結果を図 9 に示す。図 8 を見ると、推定距離

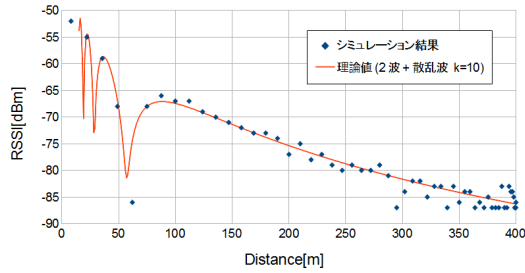


図 7 距離-RSSI 特性の例 (等加速運動)

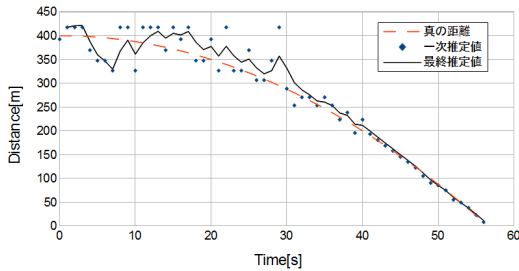


図 8 経過時間-一次推定距離の例 (等加速運動)

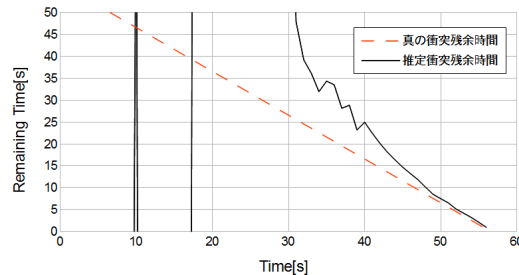


図 9 経過時間-推定衝突残余時間の例 (等加速運動)

は速度一定時と同様に真値に近い値を追尾できていることがわかる。図 9 を見ると、衝突残余時間についても、十分な時間が経過すれば推定可能であることがわかる。

次に、上記のシミュレーションを 10000 回行い、推定衝突残余時間 \hat{T}_C が 10[s] となった時の真の衝突残余時間 T_C の分布を図 10 及び 11 示す。横軸は $\hat{T}_C = 10$ [s] となった時の真の衝突残余時間 T_C 、縦軸はその発生頻度である。図 10 では、設定した 10[s] をピークとしたガウス分布状の分布が得られた。また、今回行った 10000 回のシミュレーションでは 6[s] 以下及び 13[s] 以上の T が発生せず、提案した距離推定アルゴリズムは、等速運動モデルに対しては十分な推定性能を持つことが分かる。図 11 では、設定した 10[s] より小さい 7[s] にピークを持つなど全体的に遅れて警報を発することがわかる。これは船舶間距離

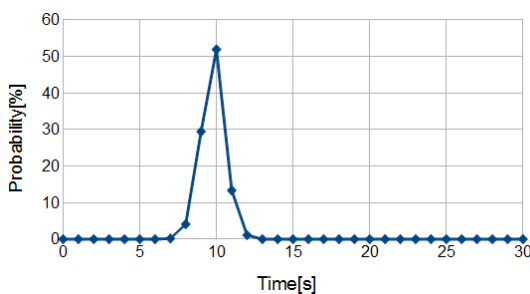


図 10 衝突残余時間の分布 (等速運動)

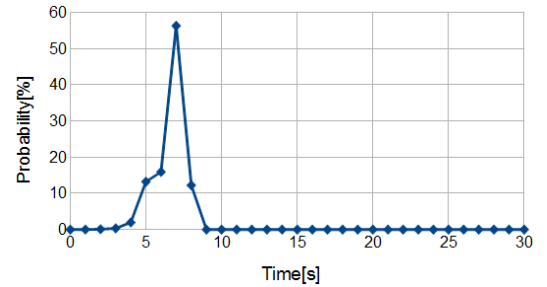


図 11 衝突残余時間の分布 (等加速運動)

の変化を線形近似しているために、加速度運動への追従が充分にできないからである。しかし、両図共に鋭いピークを持っており、警報を発する条件などを見直す事で BCAS への適応が可能であると考えられる。

5. まとめ

本稿では、小型船向けの安価な衝突警報システム BCAS を提案し、その実現のため、水上における電波伝搬モデルを検討した。水上における電波伝搬モデルとして 2 波+散乱波モデルを提案し、実験を行って有効性を示した。次に、測定された RSSI 値から距離を推定する方法を検討した。また、シミュレーションにより、提案した距離推定法の精度を検討した。

シミュレーションの結果より、今回提案する距離推定アルゴリズムを用いることで、端末間距離が一次または二次関数的に変化する場合の両方において、パラメータの調整無しに十分に正確な推定結果が得られ、衝突前に確実に警報を発するシステムの構築が可能であることが示された。カルマンフィルタなど、他の推定フィルタ [9] との比較は今後の課題である。

文 献

- [1] 福戸, 有村, 沼野, 伊藤, 岡崎, 海上で扱う情報とその利用法に関する調査, 海上技術安全研究所報告 3(5), pp.579-593, 2004-01-20.
- [2] 今津隼馬, 船舶自動識別装置 (AIS), 電子情報通信学会「知識ベース」, 11 群-2 編-2 章, pp.16-18, ver.1/2011.4.15
- [3] 高田純一, 電波伝搬の基礎理論, Microwave Workshops and Exhibition, MWE2005, Nov.9,2005
- [4] Y.Cocheril, R.Vauzelle, A new ray-tracing based wave propagation model including rough surfaces scattering, PIER 75,pp.357-381,2007
- [5] 岡村俊亮, Mote 端末を用いた船舶衝突警報システムのための距離推定実験, 静岡大学工学部卒業研究, Feb, 2011
- [6] Crossbow Corporation, IRIS datasheet, http://www.dinesgroup.org/projects/images/pdf_files/iris_datasheet.pdf
- [7] Atmel Corporation, AT86RF230 manual, <http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf>
- [8] Y.Chen, A.Terzis, On the Mechanisms and Effects of Calibrating RSSI Measurements for 802.15.4 Radios, EWSN'10, Proceedings of the 7th European Conference of Wireless Sensor Networks, pp.256-271, 2010
- [9] 小菅義夫, レーダによる単一もく両追尾法の現状と将来, 信学論 (B), J93-B, no.11, pp.1504-1511, Nov. 2010