富山湾における環境観測用センサネットワークの構築-Ⅱ. —中継ブイを考慮した回線設計—

吉田 将司*・千葉 元**・北條晴正***

A Build of the Sensor Network for an Environmental Observation in the Toyama Bay-Ⅱ.-The Link Design in Consideration of a Relay Buoy-

Masashi YOSHIDA, Hajime CHIBA and Harumasa HOJO

Abstract

Seasonal and regional variances of the marine environment have been measured in Toyama Bay. The purposes of these measurements are to prevent marine pollution, provide forecasts for fisheries as well as disaster. However, various sensors, such as those for measuring salinity and temperature of salt water, are required to conduct environmental observation in the coastal areas. Furthermore, practical arbitrary real-time observation is difficult because of the limitation of power supply methods that cannot cover such a wide range of observations. Therefore, by designating the buoys as the nodes, we conducted fundamental experiments on the sensor network. Upon measuring the receiving sensitivity and rate in the actual environment, that is, in Toyama Bay, we confirmed that the data relay among the buoys functions properly and useful data are acquired for designing circuits for the system.

Keywords : Communication, Toyama-bay, Ubiquitous Sensor Network, Buoy, Environmental Observation

キーワード : 通信, 富山湾, ユビキタスセンサネットワーク, 環境観測

1. はじめに

富山湾では海洋汚染防止、漁業、災害予測やその発生メカニズムの解明を目的に、海洋環境の季節的・場所的変動が計測されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。沿岸部は観測範囲が広く電源供給方法が限定されるため、実時間観測が困難である。陸上の分野では“フィールドサーバ”と呼ばれるユビキタスネットワーク技術が利用されている。このシステムは、多数のセンサノードをアドホックネットワークに接続してセンシングする技術であり、通信インフラや電源獲得手法の発達により実用化され始めている⁽⁴⁾。一方、海上では従来からブイを用いたデータ取得は実施されてきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾が、それらをネットワークとして機能させる試みは少なかった⁽⁷⁾。これに対し著者らは前報でブ

イをノードとしたセンサネットワークの適用を提案し、基礎的実験を行った⁽⁸⁾。その結果から、ネットワーク構成を含む回線設計の見直しとノード用モジュールの開発が必要であることが明らかとなった。著者らの目標はこの提案したシステムを実用化し、富山湾内で継続的な環境観測を実施することである。

本稿では、提案システムの概要と実用化に向けたシステム全体の見直しについて述べる。次にノード間の最大通信距離を伝搬特性から計算した。さらにブイの中継機能の確認及び設置の効果を調査するために、新たにノードモジュールを製作して実環境における受信感度及び受信率の測定を富山港内で実施した。最後に最大受信感度と通信距離から逆算した受信感度の比較から、回線マージンが決定でき、システム回線設計が容易になったことを報告する。

* 正会員 サレジオ工業高等専門学校（〒194-0215 町田市小山ケ丘 4-6-8） yoshida@salesio-sp.ac.jp

** 正会員 富山高等専門学校（〒933-0293 富山県射水市海老江練合 1 番 2）

*** 正会員 東京海洋大学客員教授（〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6）

Fig.1 The model of the system to propose

Fig.2 Line Design for Proposed System

Fig.3 Network Type

2. システムの概要と構成

2.1 沿岸センサネットワークシステムの概要

Fig.1 は提案するシステムのモデルを示している。本システムは複数の小型ブイをセンサノードと仮定し、センサ網を構成する。ノードブイからのセンシングデータをブイ間で受け渡して基地局に集約する。基地局は収集されたデータを実時間、もしくは後処理で解析する。

このシステムはブイに搭載するセンサをモジュール化することで、観測項目の異なるブイを容易に構成できる。各々異なるセンサモジュールを持ったブイ同士が共通のネットワークに接続できるため、個々のブイの性能を高めることなく観測項目が増加

する。ノードブイから基地局までの中継ノードの数を表すホップ数が少ないと観測範囲が狭くなるが、時間間隔や範囲を任意に構成できる利点がある。

Fig.2 に前報の結果から見直したシステムの概要を示す。ブイと基地局の間に障害物が多いため、マリーナや港湾などに中継局を追加する。中継局には受信無線機器と、シリアル規格を Ethernet 規格に変換するシリアルデバイスサーバを設置する。受信機がノードブイからデータを受信すると、そのデータをシリアルデバイスサーバで Ethernet 規格に変換し、インターネットを通じて基地局へ中継する。基地局はデータの保存だけでなく配信も可能である。

本システムの課題は Fig.2 の②で示した海上と陸地間及び海上のノード間通信である。従来、海上分野では携帯電話や無線 LAN が採用されてきたが、消費電力が大きく、回線維持のためのコストが必要であった。しかし低コストで複数の無線端末を経由するマルチホップ無線システムを用いて通信距離を伸ばすことができれば、その問題を解決することができる。そこで我々は ZigBee⁽⁹⁾ に代表される IEEE802.15.4 規格を採用した。この規格は、比較的省電力(10[mW])で間欠送信システム及びアドホックネットワークを構築しやすい利点がある。しかし、ノード間の通信距離が短すぎるとネットワークを構成するメリットが失われるため、ノードブイ同士の通信距離がシステム設計において重要である。

2.2 ネットワーク構成と回線設計

提案システムはセンサネットワークを構築するが、ネットワークの構成は Fig.3 に示すように Star 型、Mesh 型、Tree 型と大まかに分けられる。Star 型は中心が基地局となり、全てのブイが基地局と直接通信する。Tree 型はノードに階層構造を採用し、ノード-基地局間だけでなくノード間通信が生じる。Mesh 型は Tree 型と同様ノード間通信が生じるが、階層構造をもたない構成が可能である。

本研究では、Fig.1 のような Mesh 型ネットワーク構成を最終目標としている。実用化に向けた検討を行った結果、達成段階を①ブイと基地局(1対1)による通信距離実験、②ブイ-ブイ-基地局(Tree型)による中継機能実験、③複数のブイ-基地局(Mesh型)による総合試験と3つに分けて実施することとした。このうち本報告では①と②を実施した。なお、①~③と並行して④省電力化のための間欠送信試験と、⑤水温センサなどの実データ取得試験を実施する予定である。

Table 1 Calculation Parameter

Object	Parameter
Carrier Frequency(f)	2425[MHz]
Transmitting Power(P_t)	10[dBm]
Antenna Height(h_1, h_2)	0.7, 1.0, 1.5, 2.0[m]

Fig.4 The calculation result of a propagation model

Tree 型及び Mesh 型ネットワークを構成する場合には、ノード－基地局間の通信距離だけでなく、中継を考慮したノード間の最大通信距離が重要である。例えば沖合で使用するには 1[km]程度、湾口や港内であれば 200[m]～500[m]程度のノード間距離が必要とされる。そこでまず、ノード間の通信距離の限界値を伝搬理論から計算し求めた。海上の伝搬では、主に海面反射波が干渉を与えるため、通信距離の計算モデルは 2 波モデルを適用した。Table1 は計算に使用した各パラメータを示す。自由空間伝搬における損失 L_F は、

$$L_F = 20 \log(fd) - 27.56 - G_a \text{ [dB]} \quad (1)$$

と求められる⁽¹⁰⁾。ここで f は搬送波周波数[MHz]、 d は距離[m]、 G_a はアンテナ利得である。一方 2 波モデルによる反射損失 L_R は、

$$L_R = 20 \log \left| 2 \sin \left(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda d} \right) \right| \text{ [dB]} \quad (2)$$

である。ここで h_1, h_2 は送受信アンテナの高さ、 λ は波長を表し、Table1 中の搬送波周波数から求めることができる。ただし今回は送受信機ともにノードブイであれば、アンテナ高さが等しくなるため、 $h = h_1 = h_2$ と定義する。両式から 2 波モデルの伝搬損失 L は、

$$L = L_F + L_R \text{ [dB]} \quad (3)$$

よって、受信電力 P_r は以下のように示される。

$$P_r = P_t - L \text{ [dBm]} \quad (4)$$

ここで P_t は送信電力である。Fig. 4 に table1 のパラメータに基づき計算された距離特性を示す。縦軸が受信電力[dBm]、横軸が通信距離[m]である。「+」印は自由空間伝搬特性を、下部の線はモジュールの最大受信感度を示す。今回使用したモジュールは Digi-International 社製の XBee-Pro⁽¹¹⁾ であり、最大受信感度は $PER=10^{-2}$ で -100[dBm] (メーカー仕様値) である。この図から、通信距離が 100[m] 未満の場合はハイトパターンの影響により受信電力が大きく変動することがわかる。アンテナ高さが高いほど自由空間伝搬特性よりも受信特性が良くなるが、ブイの実用上の制約 (大きさや復元性) があることから、現状では最大でも 2.0[m] と決定した。アンテナ高さを 2.0[m] とした場合、最大ノード間距離が約 1.2[km]、0.7[m] でも 450[m] 程度得られる。沖合への展開は難しいが、港内や限定した水域であれば充分展開可能であると考えられる。

2.3 ノードモジュールの製作

次にノードブイに搭載するためのモジュール (ノードモジュール) を製作した。ブイに要求される動作は、水温や導電率などを計測するセンサの測定値を基地局に送信する機能と、他のノードからの送信データを中継する機能である。Fig. 5 にノードブイの構成を示す。ノードモジュールのプラットフォームとなるブイは、緑星社製 CB-100 を使用した。このブイに Fig. 6 で示すようなノードモジュールを設置した。このモジュールはデータ送信機能と中継機能を実装するため、H8 マイコン 3694F と XBee-Pro を搭載した。XBee-Pro は無線機とアンテナが一体となっており、モジュールケースの外に出してアンテナ高さを高くすることが可能である。なおこの CB-100 は夜間点滅用に 12[V] の電池を内蔵しており、本報告ではこの電池を電源として利用した。

IEEE802.15.4 規格の無線機の中で XBee-Pro を採用した理由は、ZigBee と同様に間欠送信により消費電流を低減できるだけでなく、ネットワーク構成可能なノード数が多く、使用帯域も無線 LAN と干渉しないよう設計されているためである。さらに「Digi-Mesh」と呼ばれるモードを使用すれば階層構造のない Mesh 型ネットワークが構成可能であるなど拡張性が高い。ZigBee 規格は Mesh 型だが階層構造を採用しているため、中継機能を持つノードは常

Fig.5 Structure of a buoy

Fig.6 Overview of a node module

時電源が必要であり、間欠送信は末端のノードに限られる。また基地局が故障等により使用不能となった場合、一旦ノードを全て停止させ、基地局を再起動したのちにノードを再起動するという動作が必要となる。これは前報の耐候試験時にこの事象が生じ、解決すべき課題となっていた。しかし Digi-Mesh は階層構造ではないため、全てのノードで間欠送信が可能であり、前述の問題がなく課題が解決できる。本報告では Digi-Mesh ではなく、Tree 型でネットワークを構成しているが、将来移行を予定している。

3. 通信実験とその評価

3.1 実験システムの構成

製作したノードモジュールを用いて、富山港内にある富山高専射水キャンパスの臨海実習場を基地局として平成22年9月の晴天時に評価実験を実施した。この実験には2.2で示したように、2つの目的がある。一つは①のブイ-基地局間における受信感度及び受信率の測定である。もう一つは②送信ブイの他に中継ブイを設置して、Tree 型ネットワーク構成に

Fig.7 The approach of a marine test

(a) Direct transmission

(b) Relay transmission

Fig.8 The situation of a transmitting buoy and a base station

における中継機能を確認することである。

Fig. 7(a) (b)に実験の構成を示す。温度センサデータを送信するブイ（送信ブイ）とそのデータの中継するブイ（中継ブイ）をそれぞれ用意した。まず我々は Fig. 7(a)で示すように、送信ブイと基地局間の通信距離を測定した（実験①）。富山高専所属の実習船「わかしお3号」で曳航した送信ブイでデータを送信する。送信データはASCIIコードにタイムスタンプと測定データを18文字で表現した。このデータを毎秒4回、9600[bps]で5分間送信した。この測定を基地局でデータが受信できなくなるまで繰り返

した。次に、Fig. 7(b)で示すように送信ブイを固定した中継実験を実施した(実験②)。

ブイの固定点は、実験①で受信率が0[%]となった場所とする。中継実験の受信率の測定は、中継ブイを曳航する以外は実験①と同様である。なお今回の実験では①、②ともに送信した1センテンス18文字全てが基地局で受信できた場合のみを「成功」と定義した。Fig. 8に(a)実験時の様子を示す。

なおこの実験における通信距離は、曳航に用いた「わかしお3号」船上で各測定時に停止後1分ごとにGPS受信機から取得した測位結果と基地局の測位結果から計算した。測位に使用したGPS受信機はハンディ型GPS受信機(精度10[m]以内)である。基地局のアンテナ高さは海面上から3.7[m]、ブイのアンテナ高さは0.7[m]である。なおアンテナは送受信機ともに無指向性ロッドアンテナを使用した。

3.2 実験結果

Fig. 9に受信率測定中のブイを曳航したわかしお3号の測位結果を示す。測位結果は緯度と経度で出力されるが、図中の単位は見やすくするために、基地局の設置位置を基準として緯度方向と経度方向[m]で表現している。この図が示すように、ボートが停止しても潮流により移動したため、距離が一定ではなかった。Fig. 10は実験①における送信ブイ-基地局間の受信率を示す。縦軸は受信率、横軸は通信距離を示す。なお、通信距離は送受信点の測位結果から求めた。受信率は300[m]までほぼ100%であるが、400[m]付近で急激に低下し、470[m]付近で受信できなくなった。Fig. 11に受信感度の計算結果を示す。Pt-Lfが自由空間伝搬特性、Pt-Lが2波モデルにおける受信電力特性を示している。Xbee-Proの受信感度は仕様によりPER=1%時であることから、実験時の受信感度は約300[m]時の受信電力と考えることができる。Fig. 11中の黒い横線は300[m]における受信電力、また薄い横線が最大受信感度の-100[dBm]を示しているが、約20[dB]の差が生じていることがわかる。

Fig. 12に実験②における送信ブイ-基地局間に中継ブイを設置した場合の基地局における受信率を示す。縦軸は受信率、横軸は送信ブイと中継ブイ間の通信距離を示す。送信ブイは実験①の結果により、基地局から480[m]離れた地点で固定した。送信ブイ-中継ブイ間の距離が100~180[m]のときに受信率が向上したが、その前後の距離では受信できなかった。100[m]未満の場合は中継ブイ-基地局間の距離

Fig.9 The positioning result of a buoy and a base station

Fig.10 Receiving rate characteristics (transmitting buoy - base station)

Fig.11 The calculation result of a receiving sensitivity(T-R)

が長くなること、180[m]以上では送信ブイ-中継ブイ間の距離が長くなりデータが届かなかったものと考えられる。実験②は実験①と比較すると受信率が低いため、実験値から受信感度を読み取ることはできない。しかし Fig. 12 の特性の傾きと Fig. 10 の受信特性から、測定できなかった 120-150[m]付近では高い受信率であることが推定できる。この付近の受信電力の計算値は-79~-81[dBm]であることから、-80[dBm]付近が実験時の受信感度と考えられる。このように、仕様の最大受信感度と比較して、実海域では受信感度が約 20[dB]劣化することが判明した。

次に、ブイ-基地局間における回線計算の比較結果を table2 に示す。この表は実験①の通信距離 $d=300$ [m]において、(a)自由空間伝搬の場合、(b)2波モデルの場合、(c)実験結果における回線計算結果をそれぞれ比較したものである。(a)と(b)は受信感度が-100[dBm]、(c)は-80[dBm]とし、所要 SNR は仕様 PER より 4.4[dB]、処理利得は IEEE. 802. 15. 4 規格の仕様 (2Mchip/s, 62.5ksymbol/s) から 15[dB]とした⁽¹²⁾。この表で示すように、受信感度が計算値と実験値で 20[dB]異なるため、マージンも同様に低下していることがわかる。なおこの計算には、仕様不明のため送受信アンテナ利得や受信機内の利得及び損失は含まれていない。

Fig.12 Receiving rate characteristics (transmitting buoy - Relay buoy)

Table 2 The comparison result of a level diagram (by test-1, $d=300$ m)

	(a)	(b)	(c)
P_t [dBm]	10.0	10.0	10.0
L_F [dB]	89.7	89.7	89.7
L_R [dB]	0.0	1.4	1.4
P_r [dBm]	79.6	81.0	81.0
Process Gain [dB]	15.0	15.0	15.0
Required SNR [dB]	4.4	4.4	4.4
Receiving sensitivity[dBm]	-100.0	-100.0	-80.0
Margin [dB]	30.9	29.5	9.5

また実験②の結果から、中継ブイを用いた Tree 型ネットワークの構成が確認できた。今回の実験では前述のように受信感度の劣化によりノード間通信距離が 100~180[m]程度であった。しかしアンテナ高さを最大 2.0[m]にすれば、受信感度の劣化を考慮してもノード間距離が 450[m]まで延長できる。450[m]であれば予め想定していた、港内や限定された水域における観測システムが構築可能であることから、許容範囲の実験結果といえる。

4. まとめ

本稿では、富山湾の沿岸環境観測の手段の一つとして、IEEE802. 15. 4 標準を利用したセンサネットワークシステムを提案した。まず提案システムの概要を示し、Mesh 型を目標に本報告では 1 対 1 と Tree 型ネットワークの回線設計検討と実験を実施した。

検討では 2 波モデルでノード間距離 (1 ホップ) を計算し、アンテナ高さが 2.0[m]で最大 1.2[km]であることを示した。次に富山港内においてブイを用いた海上試験を実施した。実環境における受信感度を測定した結果、受信感度が 20[dB]劣化することがわかった。また実験時のノード間距離は 100~180[m]であったが、アンテナ高さを 2.0[m]にすれば受信感度の劣化を考慮しても 450[m]まで拡張可能であった。次に、中継ブイを設置することで送信ブイ-基地局間通信では送信不可であった場所の受信率が向上した。この結果から Tree 型ネットワークの中継機能が確認できた。ただし今回の実験では中継ノードの定量的な改善効果は未確認である。そこで、送受信履歴をデータに加える機能をノードモジュールに追加する予定である。さらに今後はこの結果を踏まえ、2.2 で示した試験のうち、③Mesh 型ネットワークの構築と④⑤の試験実施に向け研究を進める。

謝辞

本研究を進めるにあたり、実地観測でご協力頂いた富山高専千葉研究室の学生並びに同校臨海実習場の技術職員の皆様に深く謝意を表します。

なお、この研究は科研費補助金課題番号 21700725 の一部を利用した。

参考文献

- (1) 千葉元, 古山彰一, 横井幸治, "船上 CTD/ADCP システムを用いた富山湾の海洋環境計測(環境系)," 日本建築学会北陸支部研究報告集 (47), pp112-115, 2004.

- (2) 千葉元, 吉田将司, “小型船舶・ラジオブイによる富山湾の海洋環境調査”, 日本建築学会学術講演会, 10025, 2010.
- (3) 寺内元基, 石坂丞二, “衛星データを用いた富山湾における富栄養化のモニタリング”, 沿岸海洋研究, 45(1), pp. 43-49, 日本海洋学会沿岸海洋研究部会, 2007.
- (4) 総務省近畿総合通信局, センサネットタウンに関する調査検討会報告書, 2005.
- (5) 和田雅昭, 畑中勝守, “水産業における情報技術の活用について-V. -マリンブロードバンドの活用-,” 日本航海学会論文集, Vol. 122, pp. 53-60, 2010.
- (6) Jian CUI, Shigeyuki OKUDA, Nobuyoshi KOUGUCHI, Yasuo ARAI, “Evaluation Test on Prototype Local Remote-sensing System by GPS,” Proceedings of Institute of Navigation International Technical Meeting 10, 2010.
- (7) Kuniaki KAWABATA, Takafumi KOBAYASHI, Fumiaki TAKEMURA, Hideo SATO, Tsuyoshi SUZUKI, “A Study about Wireless Network Communication Performance at the Coastal Area for Underwater Monitoring Sensor Networks,” Transactions of IEICE, E93-B No. 11, pp. 2956-2958, Nov 2010.
- (8) 吉田将司, 千葉元, 北條晴正, “富山湾における環境観測用センサネットワークの構築－システム提案とノードブイの試作－”, 日本航海学会論文集, 123, pp103-110, 2010.
- (9) ZigBee Alliance: トップページ,
<http://www.zigbee.org/>
- (10) 横山光雄, スペクトル拡散通信システム, pp. 467, 科学技術出版, 2002.
- (11) XBee-Pro, <http://www.digi-intl.co.jp/digi/wireless/point-multipoint/xbee-series1-module.html>, Digi International K.K.
- (12) 鄭立, ZigBee 開発ハンドブック, リックテレコム, 2006.

質疑応答

新井康夫 (元海技大学校)

受信率を評価されていることについては、通信環境を評価することに対して必須のことで、その努力に敬意を表します。この改善点では、単にアンテナ高を上げるのみならず、指向特性のあるアンテナを用いてゲインを上げることと海面波などの干渉波を無くすよう検討されたらよい。

吉田将司

ありがとうございます。まず指向特性と海面波の干渉を抑えるという点では、使用するアンテナについて垂直偏波と水平偏波の比較を検討中です。次に、2.4GHz 帯の場合はアンテナを分離し、指向性を絞れば高利得のアンテナが使用可能です。しかし、Mesh型のセンサネットワークで相互通信をすることを考慮すると、指向性を狭くする検討は慎重にならざるを得ません。また今回使用した XBee-Pro がアンテナと無線機で技適を取得しているため、アンテナの選択があまりできない現状があります。自由度を高めるには、さらに別のデバイスを使用しなければならないかもしれません。