

## 無線センサネットワークの基本構成

寺田 貢\*・浦田 大喜\*\*

(平成19年5月31日受理)

## The Configuration of the Wireless Sensor Network

Mitsugu TERADA\*, and Daiki URATA\*\*

(Received May 31, 2007)

### Abstract

The configuration of the wireless sensor network is shown by reviewing the technical specifications of ZigBee wireless sensor network platform with the frequency band of 2.4GHz, data rate of 250kbit/s, O-QPSK (Quadra-Phase Shift Keying) signal modulation, CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) protocol, DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) data transmission and node configuration of star, mesh and cluster-tree topologies. An experimental wireless position sensor network system was built up with the wireless sensor nodes of the frequency 315MHz, of the data rate 38.4kbit/s and of the FSK (Frequency Shift Keying) modulation.

Keywords : sensor node, wireless sensor network, ad hoc network, ZigBee, IEEE802.15.4, star topology, mesh topology, cluster-tree topology

### 1. はじめに

インターネットに代表されるコンピュータネットワークは、コンピュータの機能を従来の計算から通信に変化させるほどの大きな変革をもたらした。コンピュータネットワークを構成する通信方式は有線式から無線化されることにより、ネットワーク端末であるコンピュー

タを任意の場所に移動して使用できるようになった。この技術的な動向は、コンピュータの機能を選別して、特定の機能に重点化することで、ハードウェアが小型化され、可搬性が向上している。この技術の代表的な応用例に、店舗で製品につけられた値札などにICチップを埋め込む無線タグ<sup>1,2)</sup>があり、商品に関する情報の記録や位置検索に利用されることが期待され

\* 福岡大学理学部応用物理学科, 〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1

\*\* テレビ西日本, 〒814-8555 福岡市早良区百道浜2-3-2

\* Fukuoka University, Faculty of Science, Department of Applied Physics

\* 8-19-1 Nanakuma Johnan-ku Fukuoka-shi Fukuoka 814-0180 Japan

\*\* (present address) Television Nishinippon Corporation

\*\* 2-3-2 Momochihama Sawara-ku Fukuoka-shi Fukuoka 814-8555 Japan

ている。無線タグの素子としての機能をさらに拡張すると、各種の物理量を検出し、信号として出力することのできるセンサをネットワーク端末に実装し、周囲環境の状況を検出したセンサからの出力を、無線ネットワーク経由で、ホストコンピュータに伝えることができる。各センサどうしの間は無線で通信が行なわれ、有線LANのようなインフラストラクチャを設置することなく、分散した遠隔地点での物理量に関する情報を収集可能となる。

本論文では、コンピュータのデータ処理機能、コンピュータインタフェイスの外部入出力機能およびネットワーク素子のデータ通信機能を小型パッケージに集約させ、これにセンサを接続することにより構築した無線センサネットワークについて概説し、動作・性能確認のために行なった実験の結果を示す。

## 2. センサネットワークシステム

工場などにおける各種の生産プロセスでは、工場内の離散的な遠隔地点に局所する物理情報をセンサにより計測し、データとして収集・記録して、この測定値に基づいてプロセスを制御するという技術が利用されていた。このような計装技術は、計測工学や制御工学の主要な研究対象とされてきた。プロセス制御は、プロセス設定値に対して、実測値を許容範囲内に維持するために、アナログ量であるプロセスデータを制御するアナログ制御が実施されていた。アナログ制御は、ハードウェアに依存し、制御対象に必要な機器が専用に使われ、拡張性に問題があり、標準化が困難であった。プロセス制御にコンピュータが導入されることにより、アナログ制御はデジタル制御に移行した。デジタル制御では、コンピュータや制御機器の間の通信に、有線のRS-232またはRS-485などの規格に適合したインターフェイスが採用されて、ネットワークが構築された。RS-232またはRS-485インターフェイスはいずれも、シリアル伝送によるデータ通信を採用しているため、1台のホストコンピュータが複数のポートを持ち、ここから各機器に1本ずつ配線され、直接接続する方式がとられ、ネットワークの形態としては、

ネットワーク構成はスター型になる。スター型のネットワークは、1台のコンピュータによる集中管理には適する一方、ネットワークを管理するホストコンピュータが故障などの障害により機能しなくなったときには、センサから信号が送信されても、プロセス制御が不能となり、工程への影響が大きいという特徴があった。このように、スター型の構成では、通信ネットワークは信号伝達経路を選択することができず、通信効率を向上させることが期待できない。

IEEE488インターフェイス(GPIB: General Purpose Interface Bus)は、コンピュータと計測器をパラレルインターフェイスで接続する方式である。上記のRS-232またはRS-485インターフェイスが屋内・屋外を問わず、工場の構内の比較的遠距離の監視・制御に用いられるのに対し、IEEE488インターフェイスの通信距離は短いため、小規模の実験設備や検査装置などに利用されることが多い。通信用ケーブルのコネクタの形状に特徴があり、デジチェーン接続することができる。このため、接続方法を工夫することにより、スター型とバス型の二種類のネットワークを構成することができる方式である。バス型のネットワークでは、制御用のコンピュータと計測器がノードとなり、直列に接続されるため、1本のネットワークケーブルでコンピュータと1台の計測器が1対1に接続されるスター型よりネットワークの利用効率は改善される。その一方で、1本のネットワークケーブルを複数のノードで共有するため、データを送受信するときに、複数のノードが同時に送信を開始しようとする衝突を避ける必要性も生じる。

前述のRS-232またはRS-485インターフェイスおよびIEEE488インターフェイスは、1台の管理用コンピュータに複数の計測器や制御装置を接続するための構成で、有線のセンサネットワークに適したものであるといえる。インターネットの普及により、プロトコルをTCP/IPとする通信方式が進化し、複数のコンピュータがネットワークにより接続されることが一般化してきた。1台のコンピュータと複数台の計測器や制御装置により構成される有線のセンサネッ

トワークとの大きな相違点は、コンピュータ自体がネットワークにより他のコンピュータと接続されることである。データは、パケットと呼ばれるある一定の容量に分割され、ネットワーク内のさまざまな経路を通して、通信の相手に届けられる。このため、スター型やバス型といったネットワーク構成とは異なり、他のデータの通信に使われていない任意のノードを選択して、データを送信できるという相違点が生じた。これにより、経路選択(ルーティング)の機能が重要になった。さらに、従来は有線で構成されていたインターネット回線には、無線通信が利用されるようになった。インターネットの通信方式としての実績と無線通信の信頼性や通信技術の向上により、センサネットワークにも従来の有線方式を主流とした方式から、変化が生じ、敷設や更新に際して、工事や付帯設備を簡便化することのできる無線方式を採用することが検討されるようになった。

### 3. アドホックネットワーク

センサネットワークにも無線化が波及し、さらにコンピュータの機能をセンサのインターフェイスと通信に絞り込み、センサとコンピュータが一体化したネットワークノードを構築できるようになった<sup>3~13)</sup>。これにより、有線のネットワークに必要なケーブルやネットワーク機器などのインフラストラクチャを設置する必要もなくなり、一体化されたセンサとコンピュータをネットワークノードとして配置するだけで、互いに通信して構成されるネットワークが利用できるようになってきた。

アドホックネットワークは、自己編成ネットワークとも呼ばれ、複数のノードが存在するとき、自動的に隣接するノードと通信を行い、ネットワークを構成する通信方式である。電波の届く範囲にあるノードどうしは無線を介して通信し、データを交信する。したがって、ひとつのノードは複数の任意のノードとネットワーク接続される可能性がある。このため、各ノードには複数の通信経路が存在して、これらのいずれかの経路によって周辺のノードと接続される。このようなネットワーク構成はメッ

シュ型と呼ばれる。

ネットワーク中のノード数は、無限になる場合もある。この可能性に対応するためには、ネットワークの拡張性と信頼性が保証される必要がある。これはマルチホップ、自己編成、自動修復、動的ルーティングの機能により実現される。

- i) マルチホップは、ノード間で通信することにより、データを基地局に送信する機能である。電波の到達する有効範囲を、ノードを追加することにより、段階的に拡張することができる。
- ii) 自己編成は、ノードどうしが自動的に通信を行い、ネットワークを構築する機能である。追加されたノードがネットワークに参加し、ネットワークを拡張することができる。
- iii) 自動修復は、ノードの追加および削除の際に、ネットワークをリセットすることなく通信が継続できる機能である。
- iv) 動的ルーティングは、ネットワークの状況に応じて、通信経路を選択する機能である。ネットワークの状況とは、電波状態により良否が定まる接続品質、マルチホップの過程におけるホップ回数、ひとつのノードが他の複数のノードからの送信データを受信することを防ぐための衝突回避などによって定まる条件である。

無線センサネットワークの通信方式は、携帯電話に代表される通信が普及し、ユビキタス社会での重要性の高まりとともに、標準化の動きが展開した。IEEE802.15.4は、家電向けのホームオートメーションやファクトリオートメーションといったWPAN (Wireless Personal Area Network) への応用を目的として、2001年以降標準化作業が進み、2003年にIEEE802.15.4<sup>14)</sup>として標準化された。このIEEE802.15.4により規定される物理層とMAC (Media Access Control) 層の上に構築されるZigBeeに関する規格が策定されるに至り、標準的プラットフォームとなることが期待されている。以下に、ZigBeeの特徴を示す。

### 1) ノード数

ひとつのネットワークには、最大  $65,535(2^{16}-1)$  個のノードが接続可能である。これにより、大規模ネットワークの構築も可能である。

### 2) 周波数帯

使用が許可されている周波数帯であれば、独自のアドホックネットワークシステムに適用可能であるが、IEEE802.15.4規格では、868MHz帯、915MHz帯、2.4GHz帯の3つの周波数帯域が規定されている。これらのうち868MHz帯(868MHz~870MHz)は欧州で、915MHz帯(902~928MHz)は米国で使用されている周波数帯である。また、2.4GHz帯(2.4GHz~2.48GHz)は全世界で使用できる周波数帯である。ハードウェアの面から考えると、一般に周波数が低い方が回路構成や高周波対策という点で有利である。さらに、周波数が低いということは、毎秒の発振回数が少ないということであるから、高い周波数と比較すると、消費電力を下げるができる。2.4GHz帯は3つの中で最も周波数が高く、より広い範囲で使われている無線LANと同じ周波数帯域であるが、日本国内では免許が不要であることが利点である。

周波数帯により、データ伝送速度は異なり、それぞれの周波数帯のデータ伝送速度の最大値は、868MHz帯では20kbit/s、915MHz帯では40kbit/s、2.4GHz帯では250kbit/sである。

### 3) 低消費電力

アドホックネットワークの特徴である、自動的にノードが追加および削除されることを実現するために、ノードが独立した単体として動作する必要がある。そのため、無線通信によりネットワーク構築される必要がある。通信が無線化されるため、電源系が有線となることは合理的でないから、電源には電池が用いられることが多い。

電池の消耗を防ぎ、1回の電池交換でできるだけ長期間継続して使用するために、個々のノードが消費する電力は低く抑えられる必要がある。ノードは通信することにより電力を消費するために、ノードを間欠動作させる方法が

採用されている。ノードは、測定や通信を行なう必要のあるときにはアクティブな状態になるが、測定データを送信するとスリープ状態に移行し、電力消費量を低減させる。

一般的なノードでは、センサが検知したデータは、隣接する任意のノードに送信される。ZigBeeのようなアドホックセンサネットワークでは、ノードに要求されるデータ送信頻度は毎秒1回程度である。周波数帯域2.4GHzの場合、ノードはデータ伝送速度250kbit/sで数msの間だけデータを送信する。スリープ状態からデータ伝送を行なうアクティブな状態への遷移には、約15msの時間を要する。このため、1回のデータ送信時間は、約20ms程度である。データ送信の周期を1秒とすると、これに対するデータを送信している時間の比であるデューティ比は2%程度である。電池の使用時間のうち、電力を消費する時間が2%程度のみとなることにより、電池の消耗が防止される。

### 4) チャネル数

2.4GHz帯の周波数帯域では、日本の規制「2.4GHz帯高度化小電力データ通信システム(ARIB STD-T66)」により、2400MHzから2483.5MHzの周波数帯域の使用が許可されている。2.4GHz帯のZigBeeでは、許可された周波数帯域の中に、5MHz間隔の中心周波数で帯域幅2MHzの16のチャネルを配置している。一方、868MHz帯のチャネルはひとつだけでチャネル番号は0で、915MHz帯には10個のチャネルが割り当てられ、チャネル番号は1から10まで割り当てられている。

2.4GHz帯の中心周波数 $F_c$ は、 $k$ を11から26までのチャネル番号とし、 $F_c=2405+5(k-11)$ [MHz]で与えられる。すなわち、チャネル11の中心周波数が2405MHzで、以後5MHzずつ増え、2480MHzを中心周波数とするチャネル26まで、16のチャネルがある。いずれも帯域幅を2MHzとしていることから、隣接するチャネルと周波数が重なることがなく、理論的には同時に使用しても相互の干渉が生じることはない。このため、あるチャネルの周波数での通信状態が悪い場合は、別のチャネルを選択することで、通信状態を最適化することができる。

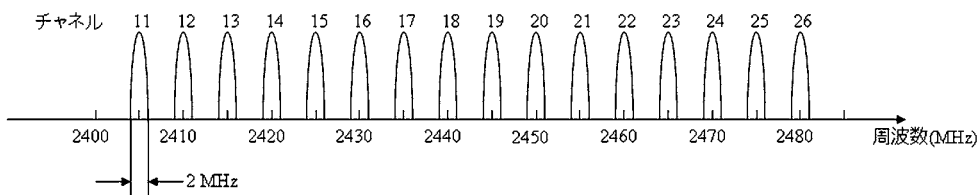


図 1. 周波数2.4GHz帯のチャンネルの中心周波数と帯域幅

る.

### 5) 通信距離

無線ネットワークの通信距離は、送信側の送信パワーと受信側の受信感度の2つのパラメータにより変化する。送信パワーを  $P$ [dBm]、受信感度を  $S$ [dBm] とすると、両者の差  $P - S$  として算出される値を無線通信の最大パスロス (Path Loss)  $PL$ [dBm] という。送信側から発した電波が、空間を伝搬することにより、電波の強度が最大パスロスの分だけ低下しても、受信側で受信可能であることを意味する。ここで、dBm は 1 mW の電力を基準としたデシベル値の単位である。IEEE802.15.4 では、受信感度は  $-85$  dBm 以上と規定され、望ましい受信信号はそれより 3 dBm 大きい電力であるとされている。したがって、この場合のパスロスは 82 dBm であり、送信機から発せられる必要のある送信パワーは  $-3$  dBm となる。これは送信電力が 0.5 mW であることに相当する。IEEE802.15.4 に対応した一般的な RF 素子の発振出力は約 1 mW であるため、0.5 mW という送信電力は、損失などで電波の強度が半減した状態に対応する。

電波の経路に障害物、反射物、回折物などが存在しないときの電波の伝搬 (自由空間伝搬) するとき、送信側の送信電力を  $P_t$ [mW]、受信側の受信電力を  $P_r$ [mW] とすると、両者の間にはフリリス (Friis) の公式<sup>(15,16)</sup> で与えられる

$$P_r = P_t \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

の関係がある。ここで、 $\lambda$  [m] は電波の波長、 $d$  [m] は送信側と受信側の距離である。両辺の常用対数をとって10倍し、

$$10 \log_{10} P_r = 10 \log_{10} P_t + 10 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$10 \log_{10} P_t - 10 \log_{10} P_r = -20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) + 10 \log_{10} d^2$$

フリリスの公式をもとに、障害物、反射物、回折物などが存在する任意の空間を電波が伝搬するときの、送信側の送信電力  $P_t$ [mW] と受信側の受信電力  $P_r$ [mW] との関係を近似的に表す式が用いられる。これは、自由空間伝搬での距離の逆二乗則に対応する  $d$  のべき 2 を  $n$  に置き換えて得られる式である。

$$10 \log_{10} P_t - 10 \log_{10} P_r = -20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) + 10 \log_{10} d^n$$

2.4GHz では、

$$-20 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) = -20 \log_{10} \left( \frac{3.00 \times 10^8}{2.4 \times 10^9} \cdot \frac{1}{4 \times 3.14} \right) \approx 40$$

となる。この値は、868MHz 帯では 31 dBm、915MHz 帯では 32 dBm となり、8 dBm から 9 dBm もの差が生じ、計算上の到達距離が 2.4GHz 帯の 10 倍に近い値となる。この点においても、散乱の影響を受けにくい、低い周波数帯を利用することに優位性がある。

ここで、 $n$  は電波の経路としての空間の品質を表す値で、 $n=2$  の場合は自由空間または見通しのよい屋外に対応し、 $n=4$  の場合は電波伝搬状態が悪い室内に対応する。すなわち、 $n$  が 2 から 4 に近づくほど、電波伝搬状態が悪化する。  $10 \log_{10} P_t - 10 \log_{10} P_r$  をパスロスの値である 82 dBm として、 $n$  に対して  $d$  を求めると、 $n=2$  で  $d=126$  m、 $n=2.5$  で  $d=48$  m、 $n=3$  で  $d=25$  m、 $n=4$  で  $d=11$  m となる。このように、 $n$  の値により計算上の電波の到達距離が決定される。

### 6) 拡散方法

シャノン・ハートレイの定理では、エラーの生じないデータ通信を行なうための条件が定められる。信号とノイズの電力の比 (SN比) を

$S/N$ としたとき、通信に必要なデータ転送速度  $C(\text{bps})$  を確保するための帯域幅  $B(\text{Hz})$  は、次式で与えられる<sup>17)</sup>。

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

この式は、データ転送速度を増加させて高速の通信を行なうためには、帯域幅を大きくする必要のあることを意味している。

対数の底 2 を自然対数の底  $e$  に変換すると、

$$\frac{C}{B} = \frac{\log_e \left( 1 + \frac{S}{N} \right)}{\log_e 2} = 1.443 \log_e \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

自然対数の項をマクローリン展開することにより、 $k$  を自然数として、

$$\frac{C}{B} = 1.443 \left( \frac{S}{N} - \frac{1}{2} \left( \frac{S}{N} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{S}{N} \right)^3 - \frac{1}{4} \left( \frac{S}{N} \right)^4 + \dots + \frac{(-1)^{k+1}}{k} \left( \frac{S}{N} \right)^k + \dots \right)$$

とすることができる。一般に、通信が行なわれる環境では、 $S/N$  比は非常に低い値となる。そのため、 $S/N \ll 1$  と考えてよく、上式は次のように書き換えられる。

$$\frac{C}{B} = 1.443 \left( \frac{S}{N} \right)$$

この結果、一定の  $S/N$  比の環境で、 $C$  の値を大きくして高速の通信を実現するためには、 $B$  の値を大きくすればよいことが分かる。

IEEE802.15.4 に規定された通信では、上の方法を応用したスペクトラム拡散のひとつの方法である直接スペクトラム拡散 (DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum) 方式が採用されている<sup>18)</sup>。これはある電波を特定の周波数に集中させず、拡散して出力する方法である。周波数を拡散させることは、帯域幅を広くすることである。

拡散させるには、送信側で送信信号とキーと呼ばれる高周波信号を掛け合わせる。これは、送信信号をデジタルサンプリングすることと類似した操作である。これにより、実際に送信されるのは、高周波の信号となり、たとえ通信の当事者以外の者により傍受されたとしても、キーの情報がなければ、単なる雑音としか認識されない。さらに、幅広い帯域に信号が分散しているため、その電波のピークの電力は減少する。受信側では、送信側と同期したキーに関する情報を有しているため、送信側からの送信信号を復元することができる。この操作を逆拡散

という。逆拡散の過程で、妨害電波や雑音の影響を低減させることができる。これは、受信した信号に妨害電波や雑音が混入していたとしても、偶然にキーと同期したものでない限り、逆拡散により復元された信号に加算されないからである。

IEEE802.15.4 では、8 ビット長のデータを対象として取り扱う。この 8 ビット長のデータを、下位 4 ビットと上位 4 ビットに分割して処理を行なう。4 ビットのデータ  $b_0 b_1 b_2 b_3$  には、0000, 1000, 0100, ..., 0111, 1111 という 0 と 1 に関する 16 通りの組合せがある。これらの 4 ビットのデータのそれぞれに対して、0 から 15 までの 10 進数のデータシンボルが割り当てられる。これにより 8 ビット長のデータは、2 つのデータシンボルに変換され、ひとつ目のデータシンボルが下位 4 ビット、ふたつ目のデータシンボルが上位 4 ビットを表す。

このデータシンボルに対して、32 ビット長のチップ値が割り当てられている。たとえば、データシンボルが 0 である 4 ビットのデータ  $b_0 b_1 b_2 b_3 = 0000$  には、チップ値

$$c_0 c_1 \dots c_{30} c_{31} = 11011001110000110101001000101110$$

のチップが割り当てられる。ひとつのデータシンボルを 32 個のチップに分割することが拡散に対応する。

このように、データ伝送速度は 250 kbps であり、10 進数のデータシンボルは 4 ビットのデータに相当するから、拡散前のデータシンボルの伝送速度は 62.5 k シンボル/秒となる。また、拡散後は拡散前のデータシンボルの伝送速度の 32 倍となり、2 M チップ/秒となる。

## 7) 変調方式

変調とは、電波としてアンテナから送信される高周波信号 (搬送波) に、伝達したい信号情報を乗せる操作である。

変調方式には各種のものがあるが、アナログ変調には、振幅変調 (AM: Amplitude Modulation)、周波数変調 (FM: Frequency Modulation)、位相変調 (PM: Phase Modulation) がある。これらはそれぞれ、連続した正弦波である搬送波  $A \sin(\omega t + \phi)$  の振幅  $A$ 、周波数  $\omega$ 、

位相 $\phi$ のいずれかを低周波の信号で変化させるものである。

デジタル変調では、デジタル値の“0”と“1”を搬送波に重畳させるため、アナログ変調の変調波形を方形波にすることに相当する。方形波による変調は、スイッチで搬送波を切り換えることと同じであるため、振幅、周波数、位相をデジタル変調する方式には、それぞれASK (Amplitude Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying)がある。

ASKは搬送波をオンオフすることで、また、FSKは異なる周波数のふたつの搬送波を切り換えることでデジタル信号を送る。PSKは搬送波の位相を切り換えることでデジタル信号を送る。すなわち、デジタル値の“0”と“1”を、たとえば位相0と $\pi$ に対応させたとして、デジタル値の変化に従って、搬送波の位相が反転することになる。

PSKの概念を進化させると、位相の変位を2つの状態の間だけに限らずにデジタル信号の送信が可能になる。そのような方式の一つに、4位相偏移変調 (QPSK: Quadra-Phase Shift Keying) がある<sup>19,20)</sup>。一般に、正弦波と余弦波を合成することにより得られる正弦波は、元の正弦波と余弦波の各々の成分が独立していて、個別に取り出すことができるという性質を用いる。正弦波は基準の位相で、位相が等しいため同相 (in-phase), I相ともいう。余弦波は正弦波と位相が $90^\circ$ ずれているため、直交している位相 (quadrature-phase), Q相ともいう。

送信側では、PSKにより変調した正弦波と余弦波を合成することにより、送信信号は $\sin(\omega t + \phi_1) + \cos(\omega t + \phi_2)$ となる。ここで、 $\phi_1$ と $\phi_2$ はPSKによる変調により、0または $\pi$ である。 $(\phi_1, \phi_2)$ の組合せにより、(0, 0), (0,  $\pi$ ), ( $\pi$ , 0), ( $\pi$ ,  $\pi$ )の4通りの状態を作ることができる。いま、位相について主に考えるため、振幅を1として考えてもさしつかえない。4つの状態を考慮し、送信信号 $\sin(\omega t + \phi_1) + \cos(\omega t + \phi_2)$ は、正弦波と余弦波が合成された結果、 $\sin(\omega t + \phi)$ と表されることになり、位相 $\phi$ がデジタル信号に応じて切り換

わることとなる。4位相偏移変調では、このように4つの状態が作られ、2ビットのデジタルデータに対応させている。

この方式で変調された信号は、受信側では送信信号と同じ周波数の正弦波 $\sin \omega t$ および余弦波 $\cos \omega t$ と掛け合わせるにより復調される。オイラーの関係式を使うと、

$$\sin(\omega t + \phi) = \frac{e^{j(\omega t + \phi)} - e^{-j(\omega t + \phi)}}{2j}$$

$$\sin \omega t = \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j}$$

$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}$$

と表される。

はじめに、正弦波 $\sin \omega t$ との積 $V_I$ を計算すると、

$$\begin{aligned} \sin \omega t \times \sin(\omega t + \phi) &= \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \times \frac{e^{j(\omega t + \phi)} - e^{-j(\omega t + \phi)}}{2j} \\ &= \frac{e^{j(2\omega t + \phi)} - e^{j(\omega t - \omega t - \phi)} - e^{j(-\omega t + \omega t + \phi)} + e^{-j(2\omega t + \phi)}}{-4} \\ &= \frac{-e^{-j\phi} - e^{j\phi} + e^{j(2\omega t + \phi)} + e^{-j(2\omega t + \phi)}}{-4} \\ &= \frac{e^{j\phi} + e^{-j\phi}}{4} - \frac{e^{j(2\omega t + \phi)} + e^{-j(2\omega t + \phi)}}{4} \\ &= \frac{\cos \phi}{2} - \frac{\cos(2\omega t + \phi)}{2} \end{aligned}$$

となる。得られた結果は、DC成分と送信信号の2倍の周波数の余弦波の和となる。ローパスフィルタを使って高周波成分である送信信号の2倍の周波数の余弦波を除去するとDC成分のみを残すことができる。

次に、余弦波 $\cos \omega t$ との積 $V_Q$ を計算すると、

$$\begin{aligned} \cos \omega t \times \sin(\omega t + \phi) &= \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} \times \frac{e^{j(\omega t + \phi)} - e^{-j(\omega t + \phi)}}{2j} \\ &= \frac{e^{j(2\omega t + \phi)} - e^{j(\omega t - \omega t - \phi)} + e^{j(-\omega t + \omega t + \phi)} - e^{-j(2\omega t + \phi)}}{4j} \\ &= \frac{-e^{-j\phi} + e^{j\phi} + e^{j(2\omega t + \phi)} - e^{-j(2\omega t + \phi)}}{4j} \\ &= \frac{e^{j\phi} - e^{-j\phi}}{4j} - \frac{e^{j(2\omega t + \phi)} - e^{-j(2\omega t + \phi)}}{4j} \\ &= \frac{\sin \phi}{2} - \frac{\sin(2\omega t + \phi)}{2} \end{aligned}$$

となる。これについても高周波成分を除去すれば、DC成分のみになる。

位相 $\phi$ について、 $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ および $315^\circ$ の4つの状態について、 $V_I$ と $V_Q$ の組み合わせ( $V_I, V_Q$ )は、

$$\left(\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4}\right), \left(-\frac{\sqrt{2}}{4}, \frac{\sqrt{2}}{4}\right), \left(-\frac{\sqrt{2}}{4}, -\frac{\sqrt{2}}{4}\right), \left(\frac{\sqrt{2}}{4}, -\frac{\sqrt{2}}{4}\right)$$

となり、 $I_Q$ 座標系において、順に第1象限、第2象限、第3象限、第4象限の点を表す。この4つの状態を、2ビットのデータとして、たとえば11, 01, 00, 10のように割り振る。

IEEE802.15.4では、この2ビットのデータを使ってチップを送信する。偶数番目と奇数番目のチップを二つずつ組み合わせ、 $c_0c_1, c_2c_3, c_4c_5, \dots, c_{30}c_{31}$ をI相とQ相の信号として送信する。したがって、 $c_0, c_2, c_4, \dots, c_{30}$ はI相、 $c_1, c_3, c_5, \dots, c_{31}$ はQ相で変調して送信する。I相とQ相をチップ送信周期の半分だけずらしたOffset-QPSK(O-QPSK)が採用されている。

### 8) 他システムとの干渉および衝突の回避

同じ2.4GHz帯を使う無線LANを規定するIEEE802.11では、2400MHzから2483.5MHzの周波数帯域を5MHzの間隔で13のチャンネルに分割し、その中心周波数は2412MHzから2472MHzである。一方、IEEE802.15.4では、2MHzの帯域幅で16チャンネルの中心周波数が割り当てられ、両者に差を設けて、両者の干渉を防いでいる。さらに、各チャンネルの受信電力を測定することで、無線LANのような他システムが使用している電波の周波数を識別し、干渉電波の少ない周波数のチャンネルを選択して通信することができる。このように、同じ周波数帯の他システムとの共存環境中で、干渉を回避し、安定な通信を実現しようとしている。

たとえば、無線LANの場合、中心波長は5MHz間隔に定められているが、通信に必要な帯域幅は約22MHzと大きい。したがって、無線LANが同時に使用できるのは3つのチャンネルに限られている。たとえば、無線LANが、チャンネル1, 6および11の3つのチャンネルを同時に使用するとき、それぞれの中心周波数(周波数範囲)は、チャンネル1が2412(2401~2423)MHz, チャンネル6が2437(2436~2448)MHz, チャンネル11が2462(2451~2473)MHzである。IEEE802.15.4規格の16のチャンネルの帯域幅は2MHzであるため、無線LANと干渉を起こす可能性が少ないチャンネルとして、チャンネル15, 20, 25および26があり、それぞれの中心周波数は2425MHz, 2450MHz, 2475MHz, 2480MHzである。無線LANを同時に使用できるチャンネルの組み合わせには、チャンネル2, 7および12とチャンネル3, 8および13などもあるが、そのいずれの組合せでも、IEEE802.15.4規格の16のチャンネルのうち4つのチャンネルは、無線LANと干渉を起こす可能性が少ない。

ネットワーク内での各ノードの送受信時における衝突を回避するための通信手順として、CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)が採用されている。通信に際して、次のような手順に従う。

- i) ノードがデータを送信しようとするとき、スリープ状態からアクティブな状態に遷移する。
- ii) 通信を開始する前に、一度受信すること

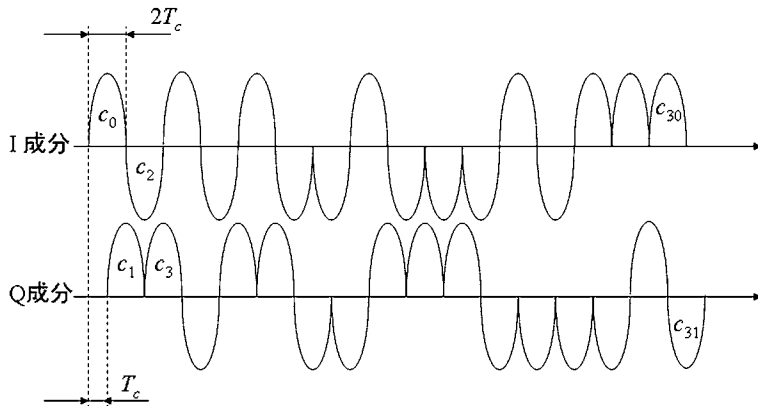


図2. O-QPSKのチップ送信



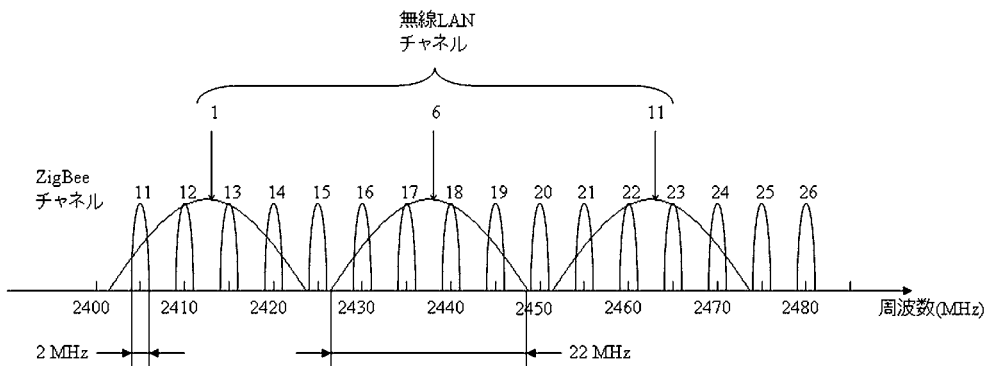


図3. 無線LANとZigBeeの帯域の周波数

で、現在通信しているノードがあるかどうか確認する（搬送波の検知：Carrier Sense）。

- iii) ネットワークの通信回線は、複数のノードで共有しているため、他のノードが通信していなければ、通信を開始する（多重アクセス：Multiple Access）。
- iv) 他のノードが通信している場合、通信終了と同時に送信を開始すると、衝突の生じる可能性が高い。そのため、他のノードの通信終了を検知した後、ランダムな長さの待ち時間が経過してから、送信を開始する（衝突回避：Collision Avoidance）。

### 9) ネットワーク構成

IEEE802.15.4規格では、「スター型」と「ピアツーピア型」のネットワーク構成をサポートしている。ノードは、センサ機能と通信機能をもつデバイスである。デバイスは、その機能によりFFD（Full Function Device）とRFD（Reduced Function Device）に分けられてい

る。

FFDは、PAN（Personal Area Network）コーディネータ、コーディネータ、デバイスの三種類の機能を有し、RFDや他のFFDと通信することができる。

デバイスについては、IEEE802.15.4とZigBeeの二通りの定義があり、前者はデバイスをハードウェアの種類で分類し、後者はZigBeeネットワークの中での役割により分類している。IEEE802.15.4規格では物理デバイスとして取り扱い、ZigBee規格では、論理デバイスとして規定している。

また、ネットワークのアーキテクチャの観点から見ると、IEEE802.15.4規格では、物理層とMAC層を規定している。ネットワーク層、アプリケーションインタフェース、アプリケーション層およびセキュリティサービスプロバイダについての規定は、ZigBee Allianceという国際的な業界団体が策定している。

コーディネータは、他のデバイスが接続することを許可するFFDである。ZigBee規格に

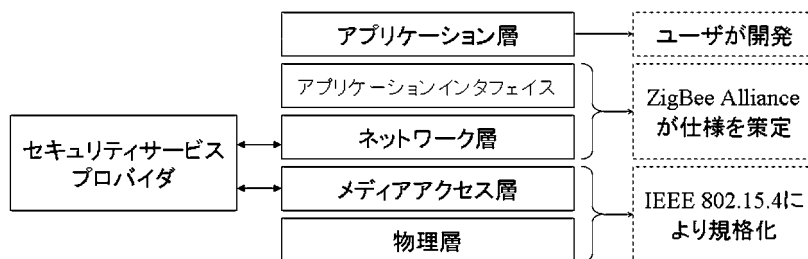


図4. ZigBeeのプロトコル構成

おける ZigBee ルータに対応している。また、PAN コーディネータは、コーディネータの中で、特にネットワークを管理する機能をもつ FFD である。ZigBee 規格の ZigBee コーディネータに対応している。

RFD は、FDD との通信のみが可能なデバイスで、赤外線センサのように、取り扱うデータ容量が小さい用途向けられたもので、メモリ容量などのハードウェア構成も軽減され、デバイスとして用いられる。ZigBee 規格のエンドデバイスに対応する。

ネットワーク上で作動するデバイスは、すべて固有の 64 ビットのアドレスを持つ。デバイスは、このアドレスにより識別されるが、PAN 内では PAN コーディネータが割り当てる短縮されたアドレスに変換されて使われることもある。

基本的なネットワーク構成は、スター型 (star topology) とピアツーピア型 (peer-to-peer topology) である。スター型では、1 台または複数のデバイスと中央制御装置として機能する 1 台の PAN コーディネータの間で通信が行なわれる。一般に、個々のデバイスには個別のアプリケーションがあり、ネットワーク通信の開始ノードまたは終端ノードとなる。PAN コーディネータは、特定のアプリケーションを有しながら、ネットワーク内の通信を監視し、通信の開始、終了、経路選択を行なう。

スター型ネットワークの基本的な構造は、図 5 に示すとおりである。1 台の FFD が作動し始めると、固有のネットワークで通信を開始しようとする。この FFD が PAN コーディネータとなる。無線の到達範囲内に FFD が複数存在すると、それぞれの FFD が通信を開始しようとするため、複数のスター型ネットワークが構築され、それぞれ独立に通信を行なうこともある。無線の到達範囲内のあるデバイスが、他のネットワークで現在使用されていないことを示す PAN 識別子を持ち、これにより PAN コーディネータになった FFD が、自分のネットワークにそのデバイスの参加を許可するかしないか選択することができる。このときの相手側のデバイスは、FFD と RFD のいずれでもかまわない。

スター型ネットワークでは、PAN コーディネータがビーコン信号を送信し、各デバイスはビーコン信号に同期して、割り当てられた時間内に通信を行う。この方式では、ひとつのデバイスに通信の占有権を与えるため、衝突が発生することなく通信が行なわれ、遅延時間を短縮することができるだけでなく、他のデバイスは休止状態に移行させることができるため、消費電力を低減できる。このようなビーコンモードにより、各ノードの間欠動作と帯域保証通信が実現される。

ピアツーピア型ネットワークは、スター型ネットワークと同様に PAN コーディネータが必要であるが、PAN コーディネータとデバイスとの「一対多」の通信であるスター型ネットワークと異なり、ネットワークに接続された任意の他のデバイスと通信できる「多対多」の通信である。ピアツーピア型ネットワークにより、さらに複雑なネットワーク構成である図 5 に示すようなメッシュ型ネットワークも構築できる。

ピアツーピア型ネットワークでは、ビーコン信号により通信が制御されるのではなく、CSMA-CA により衝突を回避して通信が行なわれる。ひとつのデバイスが周辺に存在するデバイスと常時通信することができ、これがメッシュ型ネットワークの利点となっている。その一方で、自分宛の通信を常に受信できるようにするため、間欠動作や受信待機して休止状態に移行することができず、消費電力を低減させることは困難である。

また、スター型とメッシュ型を融合した、クラスタツリー型のネットワークでは、センサ機能をもつデバイスがスター型に接続した PAN コーディネータが他のコーディネータとメッシュ型に接続する構造となる。スター型の箇所がノードの集合としてクラスタを構成する。クラスタ内のデバイスの通信を管理する PAN コーディネータが他のコーディネータと接続して、ツリー型の通信経路を構成し、この経路を通してマルチホップ方式で通信が行なわれる。

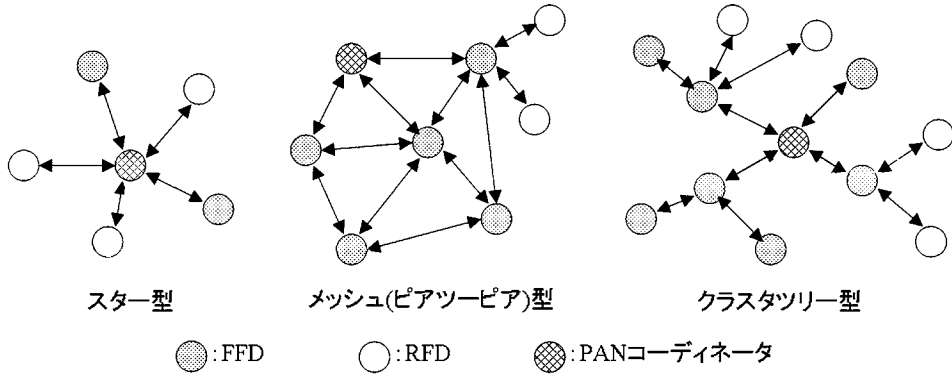


図5. IEEE802.15.4のネットワーク構成

#### 4. 無線センサネットワークの応用実験

円運動する移動体の位置を、無線センサネットワークを構築して計測するという実験を行い、アドホックネットワークの動作を検証した。

無線センサネットワークのプラットフォームには、Crossbow社製<sup>21~23</sup>のアクセスポイントMIB510とセンサノードMPR420<sup>24</sup>を使用した。

アクセスポイントMIB510は、RS232Cシリアルインタフェースにより、ホストコンピュータとなるパーソナルコンピュータに接続され、各センサノードとホストコンピュータとの間の通信基地局となる。

センサノードMPR420は、クロック周波数7.37MHzの8ビットCPUと128kBのプログラムメモリ領域が実装されている。センサ用のインターフェイスは、入力電圧0Vから3Vの10ビットアナログデジタル変換器7チャンネル、デジタル入出力12チャンネルで構成されている。通信用の無線は、周波数315MHz、最大データ伝送速度38.4kbpsで、変調方式はFSKを採用している。

位置の検出は、光センサ(CdSセル)が実装されたセンサノードを2台使用し、移動体に取り付けたランプの光量を検出して、移動体の位置を決定した。図6に2つのセンサノードおよび移動体の配置を示す。

ランプからの光をセンサノード1と2の光センサで受光し、その光量を数値として得る。予め、ランプの距離を変化させたときの光量の

値を図7に示す。ランプとセンサノードの距離が10cmのときの光量を1として規格化している。

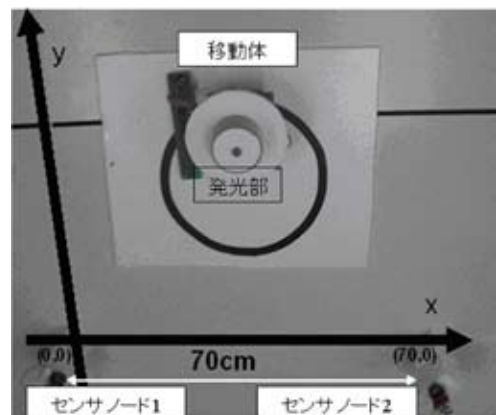


図6. センサノードを使った位置検出実験系

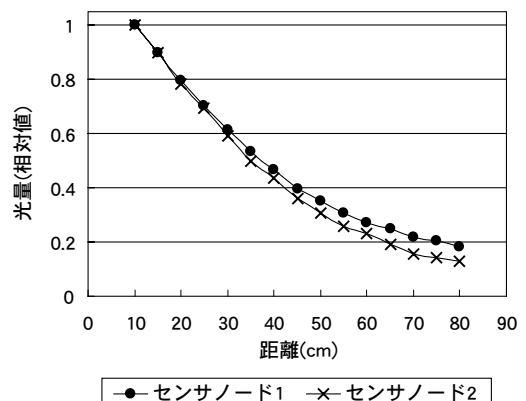


図7. 光強度測定値のランプ-センサノード間距離に対する依存性

円形の軌道上を運動するランプの位置を、ふたつのセンサノードの光検出器で測定した光量から求めた結果を図8に示す。図中の円はランプを搭載した移動体の軌道を表している。ふたつのセンサノードの光検出器で測定した光量は、図7の関係から、それぞれのセンサノードとランプとの距離に変換する。それぞれのセンサノードの位置座標の(0, 0)と(0, 70)を中心とし、センサノードとランプとの距離を半径とするふたつの円の交点をランプの位置と定義した。このようにして得られた位置を図8に示している。

ここで、■はふたつのセンサノードに近い場所に、アクセスポイントと制御用パーソナルコンピュータを設置したときの測定結果を示す。センサノードの無線周波数は315MHzであり、日本国内では微小な出力でしか発信することができないため、センサノードとアクセスポイントを同一室内に設置している。このため、ふたつのセンサノードでの測定結果は、センサノード間で行なわれる通信を除き、直接アクセスポイントに到達している。アドホックネットワークの特徴である、マルチホップ通信はほとんど行なわれない。

一方、◆はアクセスポイントと制御用パーソナルコンピュータを別室に移動し、ふたつのセンサノードとアクセスポイントが直接通信できない距離だけ離し、センサを搭載していない中継専用のふたつのノードを追加したときの測定結果である。この場合には、マルチホップ通信が行なわれている。

以上の2つの測定結果について、測定点の円軌道からのずれがほぼ等しいことが分かる。このことから、マルチホップ通信が測定結果に影響することはないと考えられる。中継ノードの数が非常に大きくなった場合には、通信されるデータのビットエラーの生じる頻度が増加する可能性があり、これが測定結果に対して影響するおそれは考えられる。中継ノードの数が少ない本実験ではその影響はほぼ生じていないといえる。

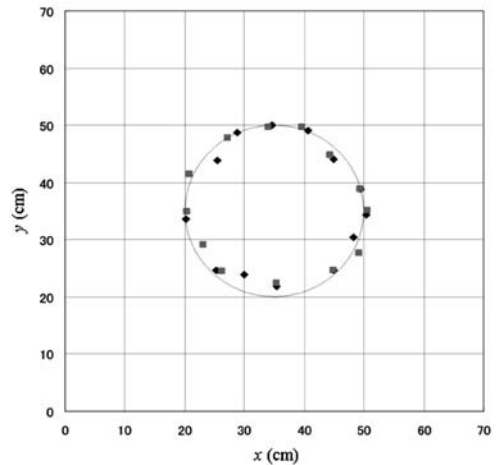


図8. 移動体の軌跡と測定結果の位置との関係  
■：中継なし，◆：中継あり，——：移動体の軌道

## 5. まとめ

本報告では、ユビキタス社会において有望な技術である無線ネットワークの基本構成について検討した。

無線センサネットワークについて、今後さまざまな分野で主流となることが予想されるZigBeeの基礎となる規格IEEE802.15.4について概説した。通信周波数は868MHz帯、915MHz帯、2.4GHz帯の三種類ある。このうち日本国内で使用可能な2.4GHz帯では、チャンネル数16、データ伝送速度250kbit/s、変調方式はO-QPSK、CSMA/CAにより衝突を回避し、直接スペクトラム拡散方式により通信を行なう。ネットワーク構成は、スター型、メッシュ型およびクラスタツリー型がある。

また、アドホックネットワークで通信が行なわれる無線センサネットワークにより、円運動する移動体の位置を検出するシステムを構築し、通信を中継するノードの数が多くない条件下では、アドホックネットワークのひとつの特徴であるマルチホップ通信が、測定結果に影響しないことを確認した。

## 文 献

- 1) 根日屋英之, 植竹古都美: ユビキタス無線工学と微細RFID第2版, p.149 (東京電機大学出版局, 2004).
- 2) 立石俊三: 無線ICタグ活用のすべて, 第4部 無線ICタグの基礎, p.177 (日経BPムック, 2005).
- 3) C-K. Toh, 構造計画研究所訳: アドホックモバイルワイヤレスネットワーク, p.27 (共立出版, 2003).
- 4) Samuel Pierre, Michel Barbeau and Evangelos Kranakis: Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks, p.1 (Springer-Verlag Berlin, 2003).
- 5) 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博: 無線LANとユビキタスネットワーク, p.129 (丸善, 2004).
- 6) Jiannong Cao, Ivan Stojmenovic, Xiaohua Jia and Sajal K. Das: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, p.13 (Springer-Verlag Berlin, 2006).
- 7) Ozan K. Tonguz and Gianluigi Ferrari: Ad Hoc Wireless Networks, p.5 (Wiley, 2006).
- 8) David E. Culler and Hans Mulder: "Smart Sensors to Network the World" Sci. Am. 290, 85 (2004).
- 9) 宮本 哲: "センサ・データの取得からノード間の送受信までをプログラミング" デザインウェブマガジン, 95, 62 (2005).
- 10) 林 慶士: "センサネットワーク", <http://www.bcm.co.jp/site/2003/2003Nov/techo-trend/03techo-trend11-sensa.htm>.
- 11) 大林成行: "アドホックタイプのセンサネットワークを導入した空間データの新しい収集・管理・提供方法の開発", <http://www.jacic.or.jp/kenkyu/7/7-9.pdf> (2005).
- 12) Technology@Intel Magazine: "ワイヤレス・センサ・ネットワークの利用モデルの拡大", [http://download.intel.com/jp/developer/jpdoc/sensor-networks-0805\\_j.pdf](http://download.intel.com/jp/developer/jpdoc/sensor-networks-0805_j.pdf) (2005)
- 13) 福永 茂, 田川忠道, 福井 潔, 谷本晃一, 菅野秀明: "ユビキタスセンサネットワークの開発", <http://www.oki.com/jp/Home/JIS/Books/KENKAI/n200/#R7>
- 14) IEEE Computer Society: 802.15.4 IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements (2003).
- 15) 松尾 優: 情報伝送工学, p.111 (共立出版, 1984).
- 16) 野本真一: ワイヤレス基礎理論, p155 (電子情報通信学会, 2003).
- 17) 横山光雄: スペクトル拡散通信システム, p.471 (科学技術出版社, 1988).
- 18) Dallas Semiconductor Maxim Application Note 1890: "An Introduction to Direct-Sequence Spread-Spectrum Communications", [http://japan.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote\\_number/1890/](http://japan.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/1890/) (2003).
- 19) Dallas Semiconductor Maxim Application Note 686: "QPSK Modulation Demystified", [http://japan.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote\\_number/686/](http://japan.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/686/) (2000).
- 20) Test & Measurement "デジタル変調方式", [http://www.orixrentec.co.jp/tmsite/index\\_know.html](http://www.orixrentec.co.jp/tmsite/index_know.html).
- 21) Raja Jurdak: Wireless Ad Hoc and Sensor Networks, p.106 (Springer Science+Business Media, LLC., 2007).
- 22) Yang Yu, Viktor K Prasanna and Bhaskar Krishnamachari: Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks, p.7 (World Scientific, 2006).
- 23) Holger Karl and Andreas Willig: Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks, p.50 (Wiley, 2005).
- 24) Crossbow: "MPR2400J/420/520 MIB User's Manual ver JA4" (2006).