

ワイヤレスハーネスのための2進MDS-IDマッチング型ウェイクアップ通信の評価

石田 繁巳^{1,2} 猿渡 俊介³ 森川 博之¹

概要: ワイヤレスハーネスの実現に向けて機器内のセンサノードの省電力化が重要となることから、筆者らは、機器の内部におけるウェイクアップ型通信を検討している。本稿では、機器内ウェイクアップ型通信の実現に向けた2進MDS-IDマッチングを示す。2進MDS-IDマッチングでは、ハミング距離の離れたIDである2進MDS-IDを用い、ハミング距離に基づいてIDマッチングを行う。回路実装とシミュレーション評価により、2進MDS-IDマッチングを用いたウェイクアップ型通信が、遅延を増加させることなく小規模な回路で高いエラー耐性を実現できることを示す。

キーワード: ワイヤレスハーネス, 省電力無線通信, ウェイクアップ型通信

Evaluation of Wake-up Communication using Binary MDS-ID Matching for Wireless Harness

SHIGEMI ISHIDA^{1,2} SHUNSUKE SARUWATARI³ HIROYUKI MORIKAWA¹

Abstract: To realize wireless harness, we present wake-up communication using *binary MDS-ID matching*. The *binary MDS-ID matching* uses IDs separated in Hamming space and performs ID matching based on Hamming distance. We perform simulations and show that the binary MDS-ID matching achieves high error tolerance without increase in latency. We implemented the ID matching circuit and show that we can implement the binary MDS-ID matching circuit in a small circuit area.

Keywords: Wireless harness, low-power wireless communication, wake-up communication

1. はじめに

自動改札機や自動券売機, コピー機, 自動車等の設計・保守コスト削減に向けて, 機器内部のハーネスを無線化するワイヤレスハーネスの検討が進められている[1]. ワイヤレスハーネスを用いる場合, 機器内のセンサノードは電池駆動となるため, センサノードの省電力化が重要となる。

筆者らは, 機器内センサノードの低消費電力化に向けてウェイクアップ型通信技術[2]~[18]の適用を検討してい

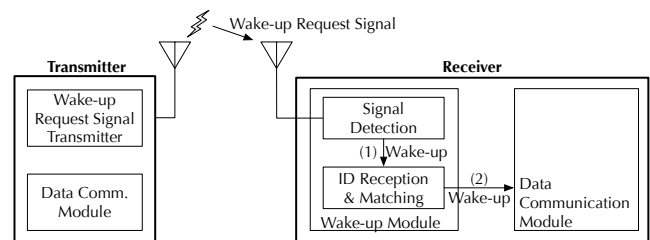


図1 ウェイクアップ型通信技術の概要

Fig. 1 Overview of a wake-up communication technology.

る。図1に示すように, ウェイクアップ型通信技術はスリープ状態にある受信機を送信機からの信号でウェイクアップさせる技術である。

機器内センサノードの通信へウェイクアップ型通信技術を適用する場合, センサノードをウェイクアップさせるた

¹ 東京大学先端科学技術研究センター
RCAST, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan
² 日本学術振興会特別研究員 DC
³ 静岡大学情報学部
Shizuoka University of Informatics, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011, Japan

めに通信エラー対策が重要となる。この時のエラー対策は、低遅延でウェイクアップできること、小規模な回路で実装できること、低消費電力で動作することが求められる。これまでの無線通信ではエラー対策として送信電力の増加、再送、エラー訂正という手法が用いられてきた。しかしながら、これらのエラー対策を機器内ウェイクアップ通信で用いると副次的な問題が生じる。

本稿では、機器内でのウェイクアップ型通信に向けて、遅延を増加させることなく小規模な回路で高いエラー耐性を実現可能な2進MDS-IDマッチングについて述べる。2進MDS-ID (Maximum Distance Separable Identifier) は、可能な限り短いID長によって各ID間のハミング距離が一定値以上となるように設計されたIDである。2進MDS-IDのハミング距離の特性を利用してハミング距離に基づいたIDマッチングを行うことで、小規模な回路によりエラー耐性を持ったIDマッチングを実現できる。

本稿の構成は以下の通りである。2ではワイヤレスハーネスにおけるウェイクアップ通信について述べる。3では2進MDS-IDマッチングについて述べる。4ではシミュレーションによりウェイクアップ率、ウェイクアップ遅延、受信待機電力の評価を行うとともに、回路実装により2進MDS-IDマッチングが小規模な回路で実現可能であることを示す。最後に5でまとめとする。

2. 機器内ウェイクアップ型通信

自動改札機や自動券売機、コピー機、自動車等の機器の内部には多数のセンサノードが配置されており、各センサノードはワイヤハーネスと呼ばれるバス配線によってコントロールユニットと接続されている。センサノードとコントロールユニットはコントロールユニットをマスタ、センサノードをスレーブとしてマスタ・スレーブ型の通信を行う。通信を行う場合、コントロールユニットはセンサノードに対してデータを要求し、要求を受けたセンサノードはコントロールユニットに対してデータを送信する。コントロールユニットは、取得したセンサデータを用いて、モータ等のアクチュエータの制御を行う。

ワイヤハーネス削減の観点から、コントロールユニットとセンサノード間の通信を無線化するワイヤレスハーネスの実現が求められている[1]。ワイヤレスハーネスでは、コントロールユニットとセンサノードのそれぞれに無線通信モジュールを搭載させてコントロールユニットを中心とするスター型ネットワークを構築する。このとき、各センサノードは、電池で駆動することが想定されるため、受信待機時の省電力化を図るべくウェイクアップ型通信技術を適用する。

図2に機器内ウェイクアップ型通信の通信プロセスを示す。(1)コントロールユニットは、ウェイクアップ要求信号送信モジュールを用いて通信したいセンサノードのIDが含まれるウェイクアップ要求信号を送信する。(2)セン

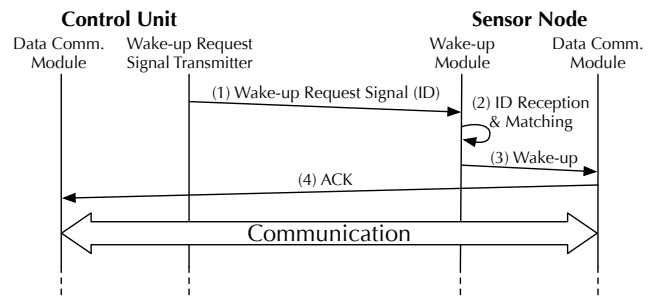


図2 機器内ウェイクアップ通信の通信プロセス
 Fig. 2 Communication process of an in-machine wake-up communication.

サノードのウェイクアップモジュールは、ウェイクアップ要求信号を受信するとウェイクアップ要求信号に含まれるIDと自センサノードのIDを用いてIDマッチングを行う。(3)自ノード宛のウェイクアップ要求信号であると判定した場合にデータ通信モジュールをウェイクアップさせ、(4)コントロールユニットに対してACKを送信してコントロールユニットとの通信が開始される。

機器内においてこのようなウェイクアップ型通信を行うためには、通信エラー対策が重要となる。機器内ウェイクアップ型通信においてウェイクアップ要求信号に通信エラーが発生すると通信対象のセンサノードがウェイクアップせず、センサノードとの通信を行うことができない。また、通信エラーによって通信対象以外のセンサノードが誤ってウェイクアップし、無駄に電力を消費することも考えられる。特に、機器内は多数のアクチュエータが複雑に配置された狭い空間であり、アクチュエータから発生する雑音や複雑なマルチパスの影響などによって通信エラーが発生することが予想される。

機器内ウェイクアップ型通信のエラー対策では、高いエラー耐性を得るとともに以下に示す3つの要件を同時に満たすことが求められる。

1つ目の要件は通信遅延の抑制である。機器内の通信で扱うセンサデータはアクチュエータの制御に使用されるため、通信遅延は機器の動作遅延を招き、機器の提供するサービスに影響を与える。

2つ目の要件は小規模な回路での実現である。機器内ウェイクアップ型通信は、コントロールユニットとセンサノードに無線通信機能を具備させることで実現される。無線通信機能を有するコントロールユニット・センサノードを現行のデバイスと同程度のサイズで実現するために小規模な回路によって無線通信を実現することが求められる。

3つ目の要件は低消費電力での実現である。機器内でのウェイクアップ型通信は省電力化を目的とするものであるため、上記のような要件を満たしつつエラー対策を行って消費電力が増加してしまっては意味がない。

これまでのウェイクアップ型通信の研究は、ウェイクアップ型の通信方式[2]~[9]とウェイクアップモジュールの省電力化[10]~[18]を中心に進められてきた。これらの

研究では通信エラーの影響を考慮しておらず、送信電力の増加や再送、エラー訂正などといった現行の無線通信におけるエラー対策の適用が暗黙的に想定されている。

最も単純なエラー対策として、送信電力を増加させることが考えられる。しかしながら、送信電力の増加は、周波数チャネルの利用効率の低下を招く。複数の機器が近接して設置される場合には機器間での干渉も考慮する必要がある。漏洩電波の削減に向けた筐体設計コスト・材料コストの増加にもつながる。また、送信電力の増加ではマルチパスの影響を削減することができないため、内部構造が複雑な機器では通信エラーを十分に削減できない可能性もある。

送信電力を大きくすることができない場合には、再送を行うことが一般的である [19]~[24]。機器内ウェイクアップ型通信の場合、コントロールユニットがウェイクアップ対象のセンサノードから ACK を受信するまでウェイクアップ要求信号を再送する方法が考えられる。しかしながら、コントロールユニットにおける ACK の受信待ち時間の必要性から通信遅延の抑制という要件を満たすことができない。

エラー対策としては、エラー訂正を行うことも考えられる [25]~[29]。機器内ウェイクアップ型通信の場合、エラー訂正を用いることでウェイクアップ要求信号を復元することができるため、再送をせずにセンサノードを高信頼にウェイクアップさせることができる。しかしながら、エラー訂正能力と符号化・復号処理の演算量がトレードオフの関係にあるため、高いエラー耐性を得るために多数のレジスタ・演算回路が必要となり、小規模な回路での実現という要件を満たすことができない。

ウェイクアップ型通信においてエラーの影響を考慮している研究としては文献 [30] 及び [31] が挙げられる。文献 [30] では、ゴールド符号から選択した2つの符号語を用いて“1”、“0”を表し、受信側で相関器によって復号することで低消費電力で高いエラー耐性を得る手法が示されている。しかしながら、このような手法では、長い符号を用いる必要があるために通信速度が大幅に低下し、通信遅延の抑制という要件を満たすことができない。

文献 [31] では、無線 LAN アクセスポイントをウェイクアップさせる“Radio-On-Demand”においてウェイクアップ要求信号の誤りの影響を軽減するために、BCH 符号を用いた ID 設計及び ID マッチング方式が示されている。エラー耐性の評価としてウェイクアップ率により BCH 符号を用いる ID マッチング方式の有効性を確認しているが、通信遅延・受信待機電力・回路規模の評価は行われていない。

3. 2進 MDS-ID マッチング

3.1 2進 MDS-ID マッチングの概要

図 3 に 2 進 MDS-ID マッチングの全体像を示す。2 進 MDS-ID マッチングは、2 進 MDS-ID の生成及びセンサノードへの割り当てと、ハミング距離に基づく ID マッチ

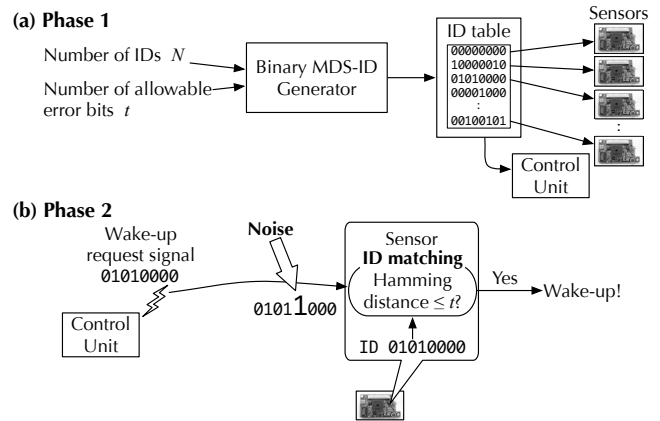


図 3 2 進 MDS-ID マッチングの全体像 (a) フェーズ 1: 2 進 MDS-ID の生成と割り当て (b) フェーズ 2: ハミング距離に基づく ID マッチング

Fig. 3 Overview of binary MDS-ID matching; (a) phase 1: binary MDS-ID generation and assignment, (b) phase 2: ID matching based on Hamming distance.

```
0000000, 0000111, 0011001, 0011110,
0101010, 0101101, 0110011, 0110100,
1001011, 1001100, 1010010, 1010101,
1100001, 1100110, 1111000, 1111111
```

図 4 2 進 MDS-ID の例 (最小ハミング距離 3, ID 数 16)

Fig. 4 Example of binary MDS-IDs (Hamming distance ≥ 3 , number of IDs = 16).

ングという 2 つのフェーズによって実現される。

第 1 のフェーズでは 2 進 MDS-ID をセンサノードの個数だけ生成し、各センサノードに 1 つずつ 2 進 MDS-ID を割り当てる。そして、コントロールユニットには通信相手となるセンサノードの 2 進 MDS-ID を登録する。

第 2 のフェーズではセンサノードにおいてハミング距離に基づく ID マッチングを行う。コントロールユニットは通信したいセンサノードの 2 進 MDS-ID を含めたウェイクアップ要求信号を送信する。センサノードがウェイクアップ要求信号を受信すると、ウェイクアップ要求信号に含まれる 2 進 MDS-ID を抽出し、自ノードの 2 進 MDS-ID とのハミング距離を算出する。ウェイクアップ要求信号の 2 進 MDS-ID と自ノードの 2 進 MDS-ID のハミング距離が許容エラービット数以下の場合に ID が一致したと判定し、データ通信モジュールをウェイクアップさせる。

3.2 2 進 MDS-ID

2 進 MDS-ID は、可能な限り短い ID 長によって ID 間の最小ハミング距離を保証するように設計された ID である。図 4 に、最小ハミング距離 3, ID 数 16 の 2 進 MDS-ID の例を示す。図に示すように、全ての ID 間のハミング距離が 3 以上となっている。

2 進 MDS-ID マッチングでは、各センサノードの ID は上記であらかじめ生成された 2 進 MDS-ID から 1 つずつ選択され、機器の製造時に各センサノードへ登録される。

それと同時に、コントロールユニットには通信を行うセンサノードの2進MDS-IDを登録する。通信を行う際には登録された2進MDS-IDを用いてコントロールユニットが通信相手のセンサノードをウェイクアップさせる。

2進MDS-IDを生成する場合、まず、ID間の最小ハミング距離 d を決定する。許容エラービット数を t とすると、 t bit の誤りが生じた場合にID間のハミング距離が1以上離れていることから、ID間の最小ハミング距離 d は

$$d = 2t + 1 \quad (1)$$

となる。

次に、ID数 N と、最小ハミング距離 d より、ID長 n を求める。シングルトン限界 [32] によれば、 q 進数の符号において、符号語の長さが n であるとき、ハミング距離が d 以上離れている符号語の数 N は、

$$N \leq q^{n-d+1}$$

となる。2進MDS-IDでは2進数を用いるため、 $q = 2$ を用いて次の式が得られる。

$$N \leq 2^{n-d+1}$$

両辺を2を底とする対数を取り、 n について解くと

$$n \geq \log_2 N + d - 1$$

が得られる。すなわち、ID数 N を実現可能な最小のビット数 n は

$$n = \lceil \log_2 N \rceil + d - 1 \quad (2)$$

となる。

最後に、求められた n をID長として制約充足問題を解くことで2進MDS-IDを生成する。生成する N 個のIDを制約充足問題の変数 X_1, X_2, \dots, X_N とし、変数が取り得る値を表す領域を0から $2^n - 1$ までの整数とする。そして、各変数間のハミング距離が d 以上という制約の下に制約充足問題を解いて変数を決定することで、 N 個の2進MDS-IDが生成される。

2進MDS-IDを生成するための制約充足問題の解法としてBacktrack法 [33]~[35]を用いる場合を以下に示す。Backtrack法では、制約のチェックを随時行いつつ X_1 から順に変数を決定していく。まず、 X_1 に0、 X_2 に0を代入し、制約のチェック（ハミング距離の確認）を行う。 X_1 と X_2 のハミング距離は0であるため、最後に決定した変数 X_2 の決定をやり直し、領域内の次の値1を代入する。同様にして制約チェックを行い、最終的に X_1 と X_2 のハミング距離が d 以上になった場合に次の変数 X_3 の決定に移る。このように、制約を満たさない場合に変数決定を遡ってやり直し、最終の変数 X_N まで決定する。

ただし、ハミング限界 [25] などの存在により、式 (2) で求めたID長では N 個のIDを生成できない場合も存在す

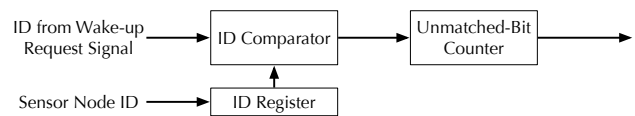


図5 ハミング距離に基づくIDマッチング回路の構成
Fig. 5 Block diagram of an ID matching circuit based on Hamming distance.

る。 N 個のIDを生成できなかった場合には、 N 個のIDが生成されるまでID長 n を1つずつ増加させながらIDの生成を試みる。

Backtrack法を用いた2進MDS-IDの生成は膨大な計算量を要する。ハミング限界を利用して計算を部分的に省略するなどの方法で計算の効率化を図ることができると考えられる。なお、機器内ウェイクアップ型通信では機器製造後にセンサノード数が増減しないため、2進MDS-IDの生成は機器の製造時に1度だけ行われる。生成された2進MDS-IDはIDという固定値としてセンサノードとコントロールユニットに登録され、運用時には2進MDS-IDの生成を行わず、登録されたIDをそのまま利用する。このため、2進MDS-ID生成時の計算量は機器の運用時には影響しない。

3.3 ハミング距離に基づくIDマッチング

ハミング距離に基づくIDマッチングは、ウェイクアップ要求信号に含まれるIDとセンサノードのIDとのハミング距離に基づいて一致判定を行うIDマッチングである。2つのID間のハミング距離が許容エラービット数 t 以下であれば、IDマッチング回路は2つのIDが一致すると判定してデータ通信モジュールをウェイクアップさせる。ハミング距離に基づくIDマッチングを行うことにより、通信エラーが t bit 以下の場合に通信対象のセンサノードをウェイクアップさせることができる。

図5にハミング距離に基づくIDマッチング回路の構成を示す。ハミング距離に基づくIDマッチング回路は、IDレジスタ、ID比較回路、不一致ビット数カウント回路で構成される。IDレジスタは、センサノードのIDを保持している回路である。ID比較回路はウェイクアップ要求信号に含まれるIDとIDレジスタに登録されているIDとを比較し、不一致ビットを示す信号を出力する。不一致ビット数カウント回路はID比較回路から出力された不一致ビット信号の数をカウントし、2つのID間のハミング距離を算出する。算出されたハミング距離が許容エラービット数 t 以下である場合にウェイクアップ信号を出力する。

ハミング距離に基づくIDマッチング回路を構成するIDレジスタ、ID比較回路、不一致ビット数カウント回路は、ID長を n とすると、それぞれ、 n 個のフリップ・フロップ回路、 n 個の2入力XORゲート、 n 進カウンタという回路で実現できる。2入力XORゲートはCMOS回路の基本となる2入力NANDゲートを4つ用いて実現され、小規

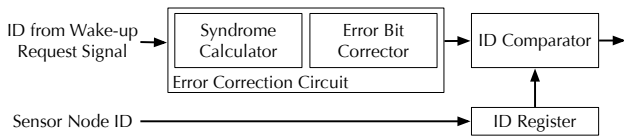


図 6 ハミング符号を用いてエラー訂正を行う ID マッチング回路の構成

Fig. 6 Block diagram of an ID matching circuit with error correction using Hamming code.

模な回路となる。 n 進カウンタは $\lceil \log_2 n \rceil$ 個のフリップ・フロップ回路で実現され、ID レジスタよりも小規模な回路となる。

ハミング距離に基づく ID マッチング回路の比較として、エラー訂正を行う ID マッチング回路について考える。エラー訂正を行う ID マッチング回路は多数の乗算回路とレジスタを必要とするため、大規模な回路となる。

エラー訂正を行う ID マッチング回路の例として、図 6 にハミング符号を用いてエラー訂正を行う ID マッチング回路の構成を示す。ハミング符号を用いてエラー訂正を行う ID マッチング回路は、ID レジスタ、エラー訂正回路、ID 比較回路から構成される。エラー訂正回路はシンドローム計算回路とエラービット訂正回路から構成される。シンドローム計算回路はウェイクアップ要求信号に含まれる ID にパリティ検査行列を乗じてシンドロームを計算し、エラービット訂正回路は計算されたシンドロームを用いてエラービットを訂正する。エラー訂正後の ID とセンサノードの ID とを比較し、全てのビットが一致する場合にウェイクアップ信号を出力する。

図 5 と図 6 を比較すると分かるように、ハミング距離に基づく ID マッチング回路も、エラー訂正を行う ID マッチング回路も共に ID レジスタと ID 比較回路を要する。ID 比較回路についてはハミング距離に基づく ID マッチング回路と同様に ID 長を n とすると n 個の 2 入力 XOR ゲートで実現できる。ハミング距離に基づく ID マッチング回路とエラー訂正を行う ID マッチング回路で異なるのが、不一致ビット数カウント回路とエラー訂正回路である。先に述べたように、不一致ビット数カウント回路が $\lceil \log_2 n \rceil$ 個のフリップ・フロップ回路で実現できるのに対し、エラー訂正回路は積和演算を行うため、 n ビットのレジスタ・乗算回路を複数必要とする。

4. 評価

4.1 評価環境

図 1 に示したように、ウェイクアップ型通信ではウェイクアップモジュールとデータ通信モジュールを用いる。ウェイクアップモジュールはウェイクアップ要求信号の信号検出と復調を行うアナログ回路と ID マッチングを行うデジタル回路とから構成される。

アナログ回路については文献 [7] で設計したものをを用いた。文献 [7] で設計したウェイクアップモジュールアナロ

グ回路の変調方式は ASK、通信周波数帯は距離による電波の減衰が比較的小さい 950 MHz 帯である。通信路符号としてマンチェスタ符号を用いており、ボーレートは 40 kBaud である。ウェイクアップモジュールアナログ回路の消費電力は、受信待機時には $12.4 \mu\text{W}$ 、ID 受信時には $310.3 \mu\text{W}$ である。

デジタル回路については新たに設計したものをを用いた。Verilog HDL を用いて ID マッチング回路を実装し、IC Compiler [36] を用いて論理合成を行った。IC Compiler による論理合成の結果から回路面積・消費電力を取得した。

データ通信モジュールはセンサノードで一般的に用いられている IEEE 802.15.4 モジュール CC2520 [37] を想定した。CC2520 の受信待機電力は電源電圧 1.8 V において 33.84 mW である。データ通信モジュールが誤ってウェイクアップした際には 1 ms 間受信待機するものとした。

このようなウェイクアップモジュールとデータ通信モジュールを用い、2 進 MDS-ID マッチングの性能を相対的に評価するために、完全一致方式 (Complete Match)、BCH-ID 方式 (BCH-ID)、2 進 MDS-ID 方式 (Binary MDS-ID) の 3 つの ID マッチング方式で性能の比較を行った。

完全一致方式は、受信したウェイクアップ要求信号の ID とセンサノードの ID をそのまま比較し、完全に一致する場合にデータ通信モジュールをウェイクアップさせる方式である。ID 長 n は、ID 数 N を表すことができる最小のビット数となるため、3 つの方式の中で最も短くなる。

BCH-ID 方式は、BCH 符号を ID として用いてハミング距離に基づいた ID マッチングを行う方式である。Radio-On-Demand [31] に示された ID マッチング方式を想定している。BCH 符号を用いるため、3 つの方式の中で ID 長が最も長くなり、高いエラー耐性を得られる。

2 進 MDS-ID 方式は、3 で示した提案方式である。2 進 MDS-ID を ID として用いてハミング距離に基づいた ID マッチングを行う。ID 長は完全一致方式よりも長く、BCH-ID 方式よりも短くなる。

4.2 ウェイクアップ率

2 進 MDS-ID マッチングを用いることでウェイクアップ型通信のエラー耐性が高まることを示すため、ウェイクアップ率の比較を行った。ウェイクアップ率とは、コントロールユニットがウェイクアップ要求信号を 1 回送信したときに、対象のセンサノードがウェイクアップする確率である。

4.1 に示した 3 つの方式について、ランダムな ID をコントロールユニットがウェイクアップ要求信号として送信する通信シミュレーションを行った。送信した ID と受信したウェイクアップ要求信号の ID とを用いて ID マッチングを行い、 E_b/N_0 (情報 1 ビット当たりの信号エネルギー対雑音電力密度比) を変化させた場合のウェイクアップ率を算出した。通信環境は AWGN (Additive White Gaussian

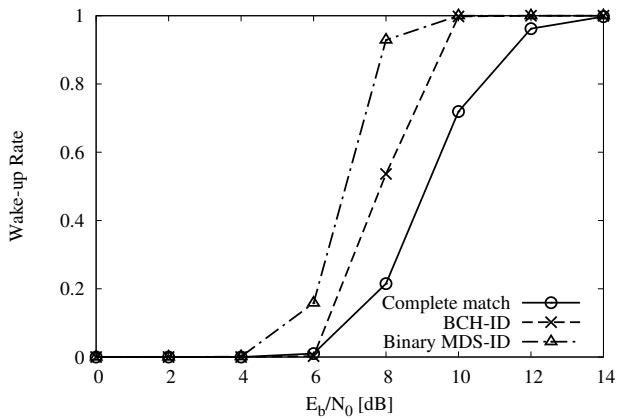


図 7 ウェイクアップ率 (ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$)

Fig. 7 Wake-up rate (the number of IDs $N = 10^{12}$, the number of allowable error bits $t = 5$).

Noise) 環境を想定し, 試行回数 10,000 回のシミュレーションを行った.

図 7 に, ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$ の場合の, E_b/N_0 に対するウェイクアップ率を示す. 図 7 より, 2進 MDS-ID 方式は 3 方式の中でウェイクアップ率が高い. ハミング距離の離れた ID とハミング距離に基づく ID マッチングを組み合わせることで, エラーが発生した場合にも ID の一致を正しく判定できるためと考えられる. BCH-ID 方式も 2 進 MDS-ID 方式と同様にハミング距離の離れた ID となっているが, ID 長が 2 進 MDS-ID 方式よりも ID 長が長いために発生するエラービット数が多くなり, 2 進 MDS-ID 方式よりもウェイクアップ率が低くなると考えられる.

4.3 ウェイクアップ遅延

ウェイクアップ率が高くなったとしても, 2 進 MDS-ID マッチングでは完全一致方式に比べて ID 長が長くなるため, 必ずしも通信遅延が削減されるとは限らない. このような観点から, ウェイクアップ遅延の比較を行った. ウェイクアップ遅延とは, コントロールユニットにおけるウェイクアップ要求信号の送信開始から, センサノードがウェイクアップするまでに要する時間である. コントロールユニットは, センサノードをウェイクアップできなかった場合にウェイクアップ要求信号を再送するため, 再送に要する時間もウェイクアップ遅延に含めた.

ウェイクアップ遅延の評価では, ウェイクアップ率に基づいて決定した再送回数をを用いてウェイクアップ遅延を算出した. 現在の機器内通信は有線で構築されているため, エラーフリー伝送 (ビット誤り率が 10^{-9} 以下) が実現されていると考えられる. ウェイクアップ型通信を行った場合にも同等の性能が得られるように, エラーフリー伝送において長さ 100 bit 程度の ID を送る場合を想定し, センサノードがウェイクアップしない確率が 10^{-7} 以下となるよう

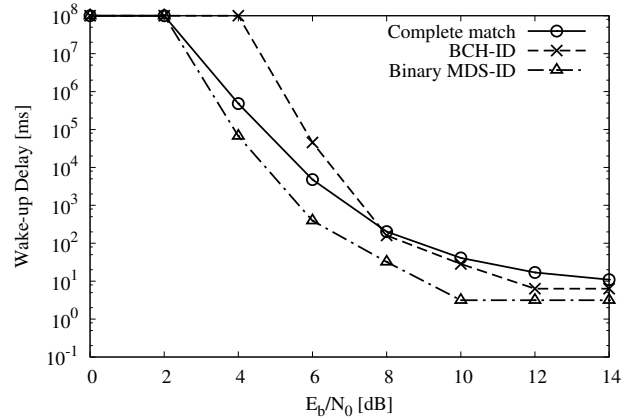


図 8 平均ウェイクアップ遅延 (ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$)

Fig. 8 Average wake-up delay (the number of IDs $N = 10^{12}$, the number of allowable error bits $t = 5$).

に再送回数を決定した. 再送の間隔はデータ通信モジュール CC2520 の受信待機時間と同じ 1 ms, ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$ である.

図 8 に, E_b/N_0 に対する平均ウェイクアップ遅延を示す. ウェイクアップ率が 0 の場合には再送回数が無限大になってしまうため, 便宜的に遅延を 10^8 ms としてプロットした. 図 8 より, 2 進 MDS-ID 方式の平均ウェイクアップ遅延が最も小さいことが分かる. 2 進 MDS-ID マッチングによってウェイクアップ率が高まり, ウェイクアップ要求信号の再送回数が減少するためと考えられる.

2 進 MDS-ID 方式と BCH-ID 方式では, E_b/N_0 が大きい場合に平均ウェイクアップ遅延がほぼ一定となっている. これは, E_b/N_0 が大きい場合にウェイクアップ率がほぼ 1 となり, 再送回数がほぼ一定となるためと考えられる.

4.4 受信待機電力

2 進 MDS-ID マッチングを用いた場合の受信待機電力を確認するために, 3 方式の平均受信待機電力の比較を行った. 平均受信待機電力の評価では, データ通信モジュールが誤ってウェイクアップした場合に消費される電力, ウェイクアップ要求信号の受信および ID マッチングに要する電力を含めた.

ウェイクアップ率の評価と同様に, ランダムに選択した ID をウェイクアップ要求信号として送信する通信シミュレーションを行い, E_b/N_0 を変化させた場合の平均受信待機電力を評価した. 車両内通信プロトコルである LIN [38] を参考に, コントロールユニット 1 個あたりに 16 個のセンサノードが接続されている環境において, コントロールユニットが各センサノードと平均 1 s 毎に通信を行う環境を想定した. ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$, 通信環境は AWGN, シミュレーションの試行回数は 10,000 回である. ウェイクアップ要求信号の再送回数は, ウェイクアップ遅延の評価と同様に, センサノードがウェイク

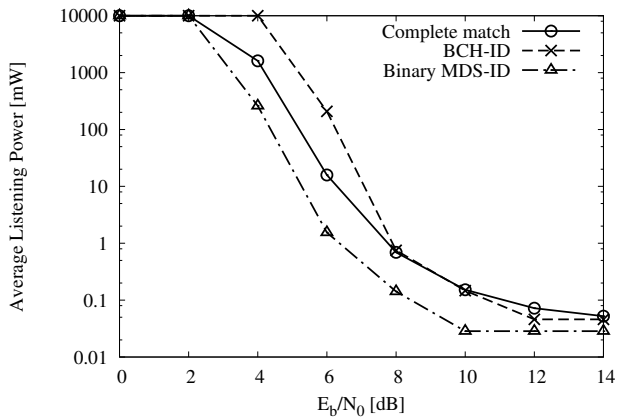


図 9 平均受信待機電力 (ID 数 $N = 10^{12}$, 許容エラービット数 $t = 5$)

Fig. 9 Average listening power (the number of IDs $N = 10^{12}$, the number of allowable error bits $t = 5$).

アップしない確率が 10^{-7} 以下となる回数をウェイクアップ率から算出した。

図 9 に 3 方式の平均受信待機電力を示す。図 9 より、2 進 MDS-ID 方式の平均受信待機電力が最も小さいことが分かる。これは、2 進 MDS-ID マッチングによりウェイクアップ要求信号の再送回数が減少するためと考えられる。ウェイクアップ要求信号の再送回数が減少することで、センサノードにおけるウェイクアップ要求信号の受信電力と誤ウェイクアップ時の電力が減少する。

一方、BCH-ID 方式の平均受信待機電力は E_b/N_0 が小さい場合に 3 方式の中で最も大きいことが分かる。BCH-ID 方式の ID 長が完全一致方式や 2 進 MDS-ID 方式よりも長い場合、ウェイクアップ要求信号の受信電力が大きく、平均受信待機電力も大きくなるものと考えられる。

4.5 回路面積

2 進 MDS-ID マッチング回路が小規模な回路で実現できることを示すため、回路面積の比較を行った。Verilog HDL を用いて実装された各方式の ID マッチング回路を、 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS を想定して論理合成を行った。論理合成には IC Compiler [36] を用い、IC Compiler の出力から回路面積を取得した。

図 10 に、ID 数 N に対する各方式の ID マッチング回路の面積を示す。図 10 より、2 進 MDS-ID 方式は完全一致方式よりも大きく、BCH-ID 方式よりも小さい回路面積で実現できることが分かる。これは、回路面積が ID 長 n にほぼ比例するためと考えられる。

BCH-ID 方式の回路面積は ID 数 N の対数に対して不連続的に増加している。これは、BCH 符号を ID として用いるために ID 長 n が不連続の値となるためと考えられる。BCH 符号を構成できる符号長 n 、最小ハミング距離 d の組み合わせには制約があるため、BCH 符号を ID として用いる BCH-ID 方式では ID 長 n が不連続の値となる。

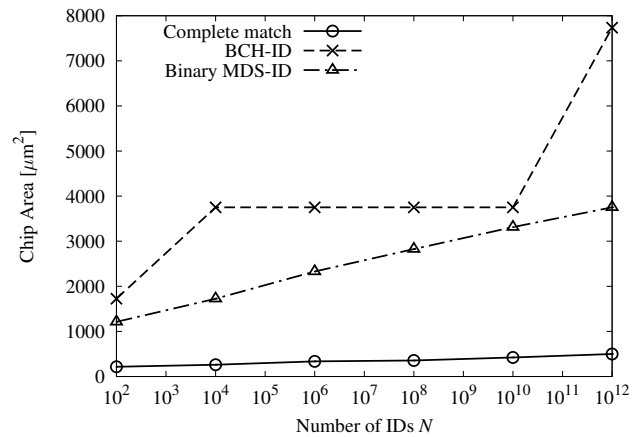


図 10 ID 数 N に対する ID マッチング回路の面積 (許容エラービット数 $t = 5$)

Fig. 10 Circuit area of ID matching circuits as a function of the number of IDs N (the number of allowable error bits $t = 5$).

5. おわりに

本稿では、機器内でのウェイクアップ型通信の実現に向けて、最小の ID 長で ID 間の最小ハミング距離を保証する 2 進 MDS-ID と、ハミング距離に基づく ID マッチングを組み合わせた 2 進 MDS-ID マッチングによる通信エラー対策を示した。シミュレーション評価により、2 進 MDS-ID マッチングが高い通信エラー耐性を低遅延・省電力に達成することを示し、回路実装を行って小規模な回路により 2 進 MDS-ID マッチングを実現できることを示した。

謝辞 本研究の一部は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通じ、シノプシス株式会社及びケイデンス株式会社の協力で行われた。

参考文献

- [1] 菊池典恭, 畑本浩伸, 奥山和典, 中林昭一, 清水 聡, 宮下 徹, 滝澤家信: 狭小かつ複雑な空間における無線通信システムの MAC プロトコルに関する一検討, 信学技報, アドホックネットワーク研究会 (AN2010-71), pp. 149-154 (2011).
- [2] Shih, E., Bahl, P. and Sinclair, M.: Wake on wireless: An event driven energy saving strategy for battery operated devices, *Proc. ACM MobiCom*, pp. 160-171 (2002).
- [3] Hall, E. S., Vawdrey, D. K. and Knutson, C. D.: RF Rendez-Blue: Reducing Power and Inquiry Costs in Bluetooth-Enabled Mobile Systems, *Proc. Int. Conf. Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 640-645 (2002).
- [4] Mishra, N., Chebrolov, K., Raman, B. and Pathak, A.: Wake-on-WLAN, *Proc. Int. Conf. World Wide Web (WWW)*, pp. 1-9 (2006).
- [5] Agarwal, Y., Chandra, R., Wolman, A., Bahl, P., Chin, K. and Gupta, R.: Wireless Wakeups Revisited: Energy Management for VoIP over Wi-Fi Smartphones, *Proc. ACM MobiSys*, pp. 179-191 (2007).
- [6] Mishra, N., Golcha, D., Bhadauria, A., Raman, B. and Chebrolov, K.: S-WOW: Signature based Wake-on-

- WLAN, *Proc. Int. Conf. Communication Systems Software and Middleware (COMSWARE)*, pp. 1–8 (2007).
- [7] 石田繁巳, 鈴木 誠, 森戸 貴, 森川博之: 低受信待機電力無線通信のための多段ウェイクアップ機構, *信学技報, 情報ネットワーク研究会 (IN2007-218)*, pp. 355–360 (2008).
- [8] Akan, O. B., Isik, M. T. and Baykal, B.: Wireless Passive Sensor Networks, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 8, pp. 92–99 (2009).
- [9] Wang, L., Zhao, D. and Ming, L.: An Energy Efficient WLAN Skype Deployment Using GSM Wakeup Signals, *Proc. IEEE Int. Conf. on Green Computing and Communications & Int. Conf. on Cyber, Physical and Social Computing (GREENCOM-CPSCOM)*, pp. 470–473 (2010).
- [10] Gu, L. and Stankovic, J. A.: Radio-triggered wake-up capability for sensor networks, *Proc. IEEE Real-Time and Embedded Technology Application Symp. (RTAS)*, pp. 27–36 (2004).
- [11] von der Mark, S. and Boeck, G.: Ultra low power Wakeup Detector for Sensor Networks, *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf. (IMOC)*, pp. 865–868 (2007).
- [12] van der Doorn, B., Kavelaars, W. and Langendoen, K.: A prototype low-cost wakeup radio for the 868 MHz band, *Int. J. Sensor Networks*, Vol. 5, No. 1, pp. 22–31 (2009).
- [13] Durante, M. S. and Mahlknecht, S.: An ultra low power Wakeup Receiver for Wireless Sensor Nodes, *Proc. Int. Conf. Sensor Technologies and Applications*, pp. 167–170 (2009).
- [14] Pletcher, N. M., Gambini, S. and Rabaey, J.: A 52 μ W Wake-Up Receiver With -72 dBm Sensitivity Using an Uncertain-IF Architecture, *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 44, No. 1, pp. 269–280 (2009).
- [15] Koskela, P. and Valta, M.: Simple wake-up radio prototype, *Proc. Workshop on Hot Topics in Embedded Networked Sensors (HotEmNets)*, pp. 1–5 (2010).
- [16] Marinkovic, S. J. and Popovici, E. M.: Nano-power wireless wake-up receiver with serial peripheral interface, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol. 29, No. 8, pp. 1641–1647 (2011).
- [17] Marinkovic, S. and Popovici, E.: Nano-Power Wake-Up Radio Circuit for Wireless Body Area Networks, *Proc. IEEE Topical Conf. Biomedical Radio and Wireless Technologies, Networks, and Sensing Systems*, pp. 1–4 (2011).
- [18] 石田繁巳, 瀧口貴啓, 猿渡俊介, 南 正輝, 森川博之: ブルームフィルタを用いたウェイクアップ型通信システム, *信学論 (B)*, Vol. J94-B, No. 10, pp. 1397–1407 (2011).
- [19] Wan, C.-Y., Campbell, A. T. and Krishnamurthy, L.: PSFQ: A Reliable Transport Protocol for Wireless Sensor Networks, *Proc. ACM Int. Workshop Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 1–11 (2002).
- [20] Stann, F. and Heidemann, J.: RMST: Reliable Data Transport in Sensor Networks, *Proc. IEEE Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, pp. 102–112 (2003).
- [21] Zhang, H., Arora, A., Choi, Y.-r. and Gouda, M. G.: Reliable Bursty Convergecast in Wireless Sensor Networks, *Proc. ACM MobiHoc*, pp. 266–276 (2005).
- [22] Liu, B., Ren, F., Lin, C. and Ouyang, Y.: Performance Analysis of Retransmission and Redundancy Schemes in Sensor Networks, *Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC)*, pp. 4407–4413 (2008).
- [23] IEEE Standards Association: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Specific Requirements: Part 11 (IEEE 802.11-2007) (2007). <http://standards.ieee.org/>.
- [24] ZigBee Alliance: ZigBee 2007 Specification (2007). <http://www.zigbee.org/>.
- [25] Hamming, R. W.: Error Detecting and Error Correcting Codes, *Bell System Technical J.*, Vol. 29, No. 2, pp. 147–160 (1950).
- [26] Gallager, R. G.: Low-density parity-check codes, *IRE Trans. Inf. Theory*, Vol. 8, No. 1, pp. 21–28 (1962).
- [27] Viterbi, A. J.: Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 13, No. 2, pp. 260–269 (1967).
- [28] Berrou, C., Glavieux, A. and Thitimajshima, P.: Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes (1), *Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC)*, pp. 1064–1070 (1993).
- [29] Reed, I. S. and Solomon, G.: Polynomial codes over certain finite fields, *J. Society for Indust. Applied Math.*, Vol. 8, No. 2, pp. 300–304 (1960).
- [30] Milosiu, H., Oehler, F. and Eppel, M.: Sub-10 μ A data reception with low latency using a 180-nm CMOS wake-up receiver at 868 MHz, *Proc. Semiconductor Conf. Dresden (SCD)*, pp. 1–4 (2011).
- [31] 難波耕佑, 四方博之, 近藤良久, 湯 素華: ウェイクアップ受信機を用いた Radio-On-Demand Networks のための ID 設計に関する一検討, *信学技報, ネットワークシステム研究会 (NS2010-187)*, pp. 135–140 (2011).
- [32] Singleton, R. C.: Maximum distance Q-Nary codes, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 10, No. 2, pp. 116–118 (1964).
- [33] Golomb, S. W. and Baumert, L. D.: Backtrack Programming, *J. ACM*, Vol. 12, No. 4, pp. 516–524 (1965).
- [34] Bitner, J. R. and Reingold, E. M.: Backtrack Programming Techniques, *Commun. ACM*, Vol. 18, No. 11, pp. 651–656 (1975).
- [35] Purdom, P. and Brown, C.: An Average Time Analysis of Backtracking, *SIAM J. Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 583–593 (1981).
- [36] Synopsys: IC Compiler: The next-generation physical design system. <http://www.synopsys.com/>.
- [37] Texas Instruments: CC2520: Second generation 2.4GHz ZigBee/IEEE 802.15.4 RF transceiver, datasheet. <http://www.ti.com/>.
- [38] LIN Administration: Local Interconnect Network (LIN) Specification Package Revision 2.1 (2006). <http://www.lin-subbus.org/>.