

ウェイクアップ型無線通信におけるビット不一致許容 ID マッチング

瀧口 貴啓[†] 石田 繁巳[†] 岸 孝彦^{††} 丹羽 栄二^{††} 見並 一明^{††}
猿渡 俊介[†] 森川 博之[†]

[†] 東京大学先端科学技術研究センター 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

^{††} 株式会社 トヨタ IT 開発センター 〒107-0052 東京都港区赤坂 6-6-20

E-mail: [†]{takiguchi,ishida,saru,mori}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp, ^{††}{ta-kishi,ei-niwa,minami}@jp.toyota-itc.com

あらまし 筆者らは、車両内センサノードの低消費電力化に向けて車両内ウェイクアップ型無線通信の検討を行っている。本稿では、車両内ウェイクアップ型無線通信の実現に向けて、最大距離分離符号とビット不一致を許容する ID マッチングを組み合わせたエラー対策を示す。回路の実装と実測の通信環境データを用いてシミュレーション評価を行い、最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせたことで、通信エラー耐性を備えた ID マッチングを小規模な回路によって実現できることを示す。

キーワード 省電力無線通信, ウェイクアップ型無線通信, 最大距離分離符号, ID マッチング

Bit Mismatch Allowable ID Matching Mechanism for Wireless Wake-up Communication

Takahiro TAKIGUCHI[†], Shigemi ISHIDA[†], Takahiko KISHI^{††}, Eiji NIWA^{††}, Kazuaki MINAMI^{††},
Shunsuke SARUWATARI[†], and Hiroyuki MORIKAWA[†]

[†] RCAST, The University of Tokyo Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo, 153-8904 Japan

^{††} Toyota InfoTechnology Center Co., Ltd. Akasaka 6-6-20, Minato-ku, Tokyo, 107-0052 Japan

E-mail: [†]{takiguchi,ishida,saru,mori}@mlab.t.u-tokyo.ac.jp, ^{††}{ta-kishi,ei-niwa,minami}@jp.toyota-itc.com

Abstract We present bit mismatch allowable ID matching using maximum distance separable codes for in-car wireless wake-up communication, which reduces idle listening energy for in-car wireless sensor nodes. We implemented the ID matching circuit and show that the bit mismatch allowable ID matching can be implemented in a small circuit compared to ID matching using error correction. We also perform simulations using real in-car environmental data and show that the bit mismatch allowable ID matching using maximum distance separable codes improves tolerance to communication errors.

Key words low-power wireless communication, wake-up wireless communication, maximum distance separable codes, ID matching

1. はじめに

自動車内のワイヤハーネスの削減に向けて、車両内センサのデータ通信を無線化する手法が提案されている [1]。車両内に設置されたセンサノードは電池駆動となることから、センサノードの省電力化が重要となる。一般に、無線センサノードにおいては通信の消費電力が支配的となることが知られている [2]。センサノードの省電力化に向けて通信の低消費電力化が求められている。

筆者らは、センサノードの通信の低消費電力化に向けて、ウ

ェイクアップ型無線通信 [3]~[6] の適用を検討している。図 1 にウェイクアップ型無線通信システムの概要を示す。ウェイクアップ型無線通信システムはウェイクアップモジュールと従来のデータ通信モジュール（微弱無線モジュール等）を組み合わせで構成される。ウェイクアップモジュールは受信待機電力が極めて小さい通信モジュールである。電波検出回路と ID マッチング回路により構成され、電波検出回路は常時動作して受信待機を行う。データ通信時には、通信したい端末の ID が含まれるウェイクアップパケットを送信する。ウェイクアップモジュールはウェイクアップパケットを検出すると ID マッチング回路

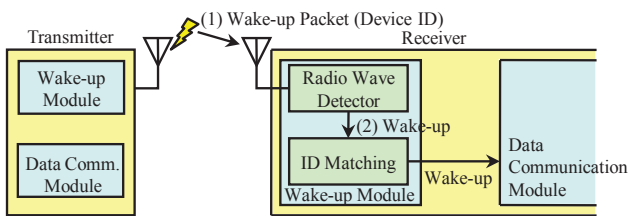


図 1 ウェイクアップ型無線通信システムの概要

をウェイクアップさせ、ID が自端末宛であればデータ通信モジュールをウェイクアップさせて通信を開始する。

本稿では、車両内ウェイクアップ型無線通信の実現に向けて、最大距離分離符号と数個のビット不一致を許容する ID マッチングを組み合わせた手法について述べる。ID マッチング回路の実装を行い、ビット不一致許容 ID マッチング回路がハミング符号を用いるエラー訂正回路の約 0.65 倍の回路規模で実現できることを示す。また、車両内で実測した通信環境データを用いてシミュレーション評価を行い、ID の完全一致判定を行う ID マッチングに比べて SNR が 10 dB の場合に受信待機電力を約 60 %、最大遅延時間を約 85 %削減できることを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2. では車両内センサネットワークにおけるウェイクアップ型無線通信について述べ、3. では最大距離分離符号と数個のビット不一致を許容する ID マッチングを組み合わせた ID マッチング手法を示す。4. では最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせた ID マッチング手法について、回路の実装とシミュレーションによる評価を行い、最後に 5. でまとめとする。

2. 車両内ウェイクアップ型無線通信

自動車内には多数のセンサノードが設置されており、各センサノードは ECU (Electric Control Unit: 電子制御ユニット) と通信を行う。センサノードと ECU 間の通信は CAN [7] や LIN [8], FlexRay [9] などの通信規格を用いた有線通信である。これらの通信規格ではバス型のネットワークトポロジが用いられ、ECU をマスタ、センサノードをスレーブとするマスタ・スレーブ型の通信が行われる。通信を行う場合、ECU 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 ECU に対してデータを返信する。このようにして取得したセンサデータを用いて ECU はモータ等のアクチュエータの制御を行う。高速な動作を行うアクチュエータは短い間隔での制御を必要とするため、センサノードと ECU 間の通信は低遅延であることが求められる。

自動車の安全性や快適性の向上などのために車両に搭載されるセンサノードの数は増加しており、通信や電源の配線を束ねたワイヤハーネスが問題となっている。現在の自動車には数十台の ECU、数百台のセンサノードが搭載されており、ワイヤハーネスの重量は 50 kg、全長は 3 km にも達する。将来的には数百台の ECU、数千台のセンサノードが搭載されると予想されており、ワイヤハーネスがさらに増加する。ワイヤハーネスが増加すると生産コストの増加や配線の複雑化による生産性・

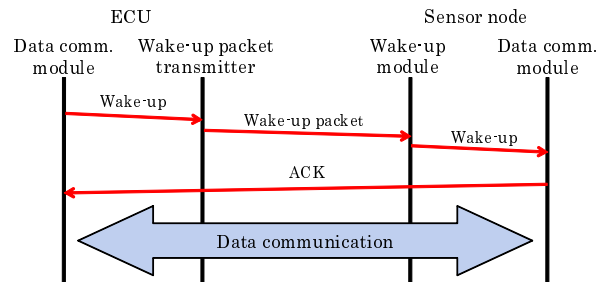


図 2 車両内ウェイクアップ型無線通信の通信プロセス

メンテナンス性の低下、ワイヤハーネス除去作業の増加によるリサイクル効率の低下、重量の増加による燃費の低下などの問題が発生する。

ワイヤハーネスに起因する問題を解決するため、車両内通信を無線化する手法が提案されている [1]。センサノードと ECU 間の通信を無線化する場合、センサノードは電池駆動になることからセンサノードの省電力化が重要となる。一般に、無線通信を行うセンサノードにおいては通信の消費電力が支配的となることが知られている [2]。このため、センサノードと ECU 間の通信を無線化するためには、センサノードの通信の低消費電力化が重要となる。

センサノードの低消費電力化に向けて、センサノードと ECU 間の通信にウェイクアップ型無線通信を適用する。車両内のセンサノードの通信にウェイクアップ型無線通信を適用する場合、ECU は各センサノードをウェイクアップさせて通信を行う。図 2 に車両内ウェイクアップ型無線通信の通信プロセスを示す。ECU は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パケットをウェイクアップパケット送信機を用いて送信する。ウェイクアップパケットを受信したセン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パケットに含まれる ID とセンサノードの ID を比較し、2 つの ID が一致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る。データ通信モジュールがウェイクアップすると ECU に対して ACK を送信し、ECU とのデータ通信を開始する。

このような通信を行う車両内ウェイクアップ型無線通信では、通信エラー対策が重要となる。車両内ではエンジンやモータなどのアクチュエータからのノイズが大きく、センサノードが受信したウェイクアップパケットにビットエラーが含まれている場合がある。ウェイクアップパケットにビットエラーが含まれている場合、ウェイクアップ対象のセンサノードはウェイクアップパケットに含まれる ID とセンサノードの ID が一致しないと判定し、データ通信モジュールをウェイクアップさせない。

無線通信では通信エラー対策として再送を行う手法が一般的である [10] ~ [15]。車両内ウェイクアップ型無線通信では、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 ECU がウェイクアップパケットを一定時間毎に再送する方法が考えられる。しかしながら、ウェイクアップパケットの再送は、通信開始遅延の増加、ウェイクアップパケット受信回数の増加に伴うセンサノードの消費電力の増加という問題につながる。

再送以外の通信エラー対策としてエラー訂正を行う手法が考

えられる [16] ~ [20] . エラー訂正ではビットエラーを含むビット列から元のビット列を復元するために多数のレジスタ, 多数の演算回路を必要とする . このため, ウェイクアップ型無線通信の ID マッチング回路に比べてエラー訂正回路の規模は大きなものとなる . 車両内には多数のセンサノードが設置されることから, 回路の大規模化によるセンサノード 1 台当たりのコストの増大は車両全体のコストに大きな影響を与える .

3. ビット不一致を許容する ID マッチング

車両内でのウェイクアップ型無線通信の実現に向けて, 最大距離分離符号とビット不一致を許容する ID マッチングを組み合わせた通信エラー対策を示す . 最大距離分離符号は各符号間のハミング距離が最大となるように設計された符号であり, 通信エラー対策において理想的な符号である . 最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせることで, 通信エラー耐性を備えた ID マッチング回路を小規模な回路によって実現できる .

最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせる通信エラー対策は, 2 つのフェーズによって実現される . 第 1 のフェーズでは最大距離分離符号を作成し, 作成された最大距離分離符号をセンサノードに ID として割り当てる . センサノードに割り当てる ID をウェイクアップ ID と呼ぶ . ウェイクアップ ID は, ECU がウェイクアップさせるセンサノードを指定するために用いる ID である . ECU には通信を行うセンサノードのウェイクアップ ID を登録する .

第 2 のフェーズでは, ウェイクアップ ID を用いたビット不一致許容 ID マッチングを行う . ECU は通信したいセンサノードのウェイクアップ ID を含むウェイクアップパケットを送信する . センサノードがウェイクアップパケットを受信すると, ウェイクアップパケットのウェイクアップ ID を抽出し, センサノードに登録されているウェイクアップ ID との ID マッチングを行う . このとき, ある程度の不一致がある場合にも ID が一致したと判定する ID マッチングを行い, データ通信モジュールをウェイクアップさせる .

3.1 センサノード ID の割り当て

各センサノードには最大距離分離符号を ID として割り当てる . センサノードへの最大距離分離符号の割り当ては, 符号長の決定, 最大距離分離符号の作成, センサノードへの ID の割り当ての 3 つのステップによって実現する .

第 1 ステップでは最大距離分離符号を作成するために符号長 n を決定する . 符号長 n は作成する符号数 N および許容エラービット数 t から決定される . 許容エラービット数 t は ID マッチングにおいて許容するビット不一致の数であり, ビットエラーが発生した場合でもエラービット数が許容エラービット数 t 以下である場合には ID マッチングを正しく行うことができる . 最大距離分離符号では, 許容エラービット数 t , 符号数 N , 符号長 n の間に

$$N = \frac{2^n}{\sum_{k=0}^t \binom{n}{k}} \quad (1)$$

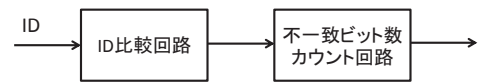


図 3 ビット不一致許容 ID マッチング回路の構成

が成り立つ [21], [22] . 通信環境から決定した許容エラービット数 t と作成する符号数 N を式 (1) に代入し, 符号長 n を決定する .

第 2 ステップでは許容エラービット数 t と作成する符号数 N , 符号長 n をパラメータとして, [23] ~ [26] 等に示された手法を用いて最大距離分離符号を作成する . 例えば [23] の手法では, $N \times (n - \lceil \log_2 N \rceil)$ のコーシー列を用いた行列演算を繰り返すことで, N 個の最大距離分離符号を作成する .

第 3 ステップでは最大距離分離符号を各センサノードにウェイクアップ ID として割り当てる . ウェイクアップ ID は上記で作成された最大距離分離符号から 1 つずつ選択され, 車両製造時に各センサノードに 1 つずつ割り当てられる . ウェイクアップ ID の ID 長は n であり, 最大で N 個のセンサノードに割り当てることができる . ECU には通信を行う複数のセンサノードのウェイクアップ ID を登録し, 通信を行う際には登録されたウェイクアップ ID を用いて通信相手のセンサノードをウェイクアップさせる .

ウェイクアップ ID として用いる最大距離分離符号の作成には膨大な計算量を必要とするが, 車両内センサネットワークでは符号作成時の計算量は問題とならない . 車両内センサネットワークでは車両製造後にセンサノード数が増減せず, 最大距離分離符号の作成は車両製造前に一度だけ行われる . 作成された最大距離分離符号は固定の値であるウェイクアップ ID として用いられるために, 符号作成時の計算量はセンサネットワークの運用時には影響しない .

3.2 ビット不一致許容 ID マッチング

ID マッチングでは, ウェイクアップパケットに含まれる ID とセンサノード ID の 2 つの ID を比較する . このとき, 2 つの ID の不一致ビット数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 . ビット不一致を許容する ID マッチングを行うことにより, ウェイクアップパケットにビットエラーが含まれる場合にも高い確率で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 .

ビット不一致許容 ID マッチングは XOR ゲートと最大値の小さなカウンタという小規模な回路で実現できるために, 回路規模は小さい . 図 3 にビット不一致許容 ID マッチング回路の構成を示す . ビット不一致許容 ID マッチング回路は ID 比較回路と不一致ビット数カウント回路で構成される . ID 比較回路はセンサノード ID とウェイクアップパケットに含まれる ID を比較し, 各ビットについて不一致を示す信号を出力する . ID 比較回路は XOR ゲートで実現できる . 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の数をカウントし, 不一致ビット数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 . 不一致ビット数カウント

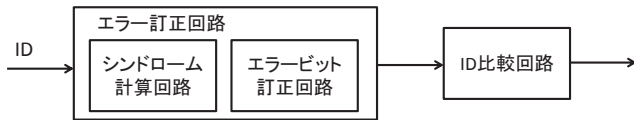


図 4 ハミング符号を用いてエラー訂正を行う ID マッチング回路の構成

回路は許容エラービット数 t を最大値とするカウンタによって実現できる．最大値が t であるカウンタは $\lceil \log_2 t \rceil$ 個のフリップ・フロップによって実現されるため， t が ID 長よりも短いことを考えると ID を保持するレジスタに比べて小規模な回路となる．

これに対し，エラー訂正を行う ID マッチングでは多数の乗算回路とレジスタを必要とするため，大規模な回路が必要となる．エラー訂正を行う ID マッチング回路の例として，図 4 にハミング符号を用いる 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，シンドローム計算回路とエラービット訂正回路から成るエラー訂正回路と，ID 比較回路とから構成される．シンドローム計算回路はウェイクアップパケットの 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シンドロームを用いてエラービットを訂正する．ID 比較回路はエラー訂正後の ID とセンサノード ID を比較し，すべ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．ID 比較回路については不一致ビット許容 ID マッチングと同様に小規模な回路で実現できるが，エラー訂正回路は積和演算を行うために多数の乗算回路とレジスタを必要とする．このため，ハミング符号を用いてエラー訂正を行う ID マッチング回路はビット不一致許容 ID マッチング回路に比べて大規模な回路となる．

4. 評価

最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせた ID マッチング手法の評価を回路の実装とシミュレーションによって行った．まず，ID マッチング回路の実装により回路規模の評価を行った．次に，自動車内で実測した通信環境データを用いたシミュレーションにより受信待機電力と最大遅延時間の評価を行った．

4.1 回路規模

回路規模の評価では，ID マッチング回路を Verilog HDL を用いて実装し，Design Compiler [27] を用いて論理合成を行った．このとき，論理合成ツールの Design Compiler から ID マッチング回路の実現に必要なゲート数を取得し，このゲート数を用いて回路規模を評価した．評価では，許容エラービット数 $t = 1$ であるビット不一致許容方式，許容エラービット数 $t = 0$ である完全一致方式，ハミング符号を用いてエラー訂正を行うハミング符号方式の 3 種類の ID マッチング方式についてゲート数の比較を行った．各 ID マッチング方式において，最大センサノード数 N は ID 長 n にほぼ比例するため，最大センサノード数 N が同一となるような ID 長 n を用いた場合のゲート数を比較した．

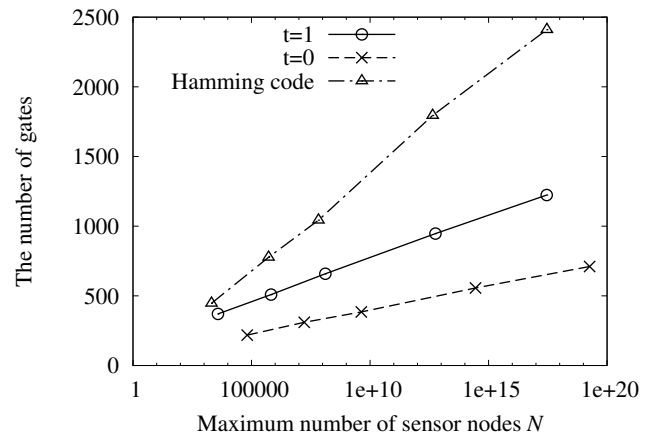


図 5 最大センサノード数 N に対する ID マッチング回路のゲート数

表 1 雑音特性の測定条件

測定機器	ベクトルシグナルアナライザ (アンリツ社製 MS2830A)
測定環境	電波暗室 (エンジン停止， 座席モータ on/off 繰り返し状態)
測定位置	運転席背面上部
測定項目	雑音波形
周波数	950 MHz
周波数分解能およびポイント数	10 kHz, 10,001 ポイント
時間軸分解能および測定時間	5.0 μ s, 5 ms

表 2 電波伝搬特性の測定条件

測定機器	ネットワークアナライザ (アジレント社製 E5071C)
測定環境	エンジン停止状態
送信位置	運転席座面中央
測定位置	運転席背面上部
測定項目	周波数伝達特性
周波数	868–960 MHz 帯
周波数分解能およびポイント数	10 kHz, 10,001 ポイント
時間軸分解能および測定時間	0.0625 μ s, 50 ms (FFT 変換)

図 5 に最大センサノード数 N に対する ID マッチング回路のゲート数を示す．ID マッチング回路のゲート数は最大センサノード数 N に対してほぼ線形に増加する．最大センサノード数 N が 100 万個の場合，ID マッチングに用いる各回路のゲート数は，ID 比較回路 310，不一致ビット数カウント回路 199，エラー訂正回路 467 である．完全一致方式の ID マッチング回路は ID 比較回路が支配的であるのに対し，ビット不一致許容方式では不一致ビット数カウント回路が加わり，ゲート数は完全一致方式の約 1.6 倍となる．また，ハミング符号方式の ID マッチング回路はエラー訂正回路と ID 比較回路から構成されるため，ゲート数は完全一致方式の約 2.5 倍となる．したがって，ビット不一致許容方式を用いることでハミング符号方式と比較してゲート数を約 35% 削減できる．

4.2 受信待機電力

受信待機電力は自動車内において測定した雑音特性と電波伝搬特性を用いたシミュレーションによって評価を行った．表 1，

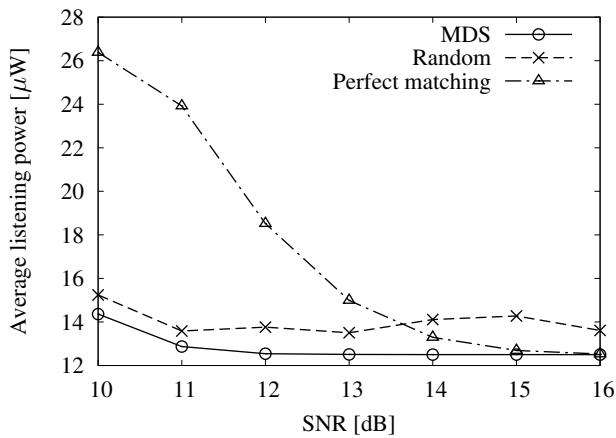


図 6 平均受信待機電力

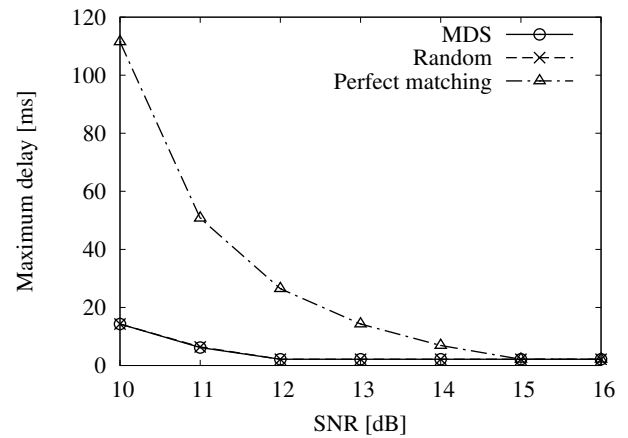


図 7 最大遅延時間

表 2 にシミュレーションに使用した雑音特性と電波伝搬特性の測定条件を示す．測定条件は，座席内部に設置されたセンサノードにおけるウェイクアップ型無線通信を想定して決定された．雑音特性と電波伝搬特性の実測データを用いてシミュレーションにより受信待機電力を求め，3 つの ID マッチング方式について比較を行った．比較を行ったのは，最大距離分離符号をウェイクアップ ID としてビット不一致許容 ID マッチングを行う MDS (Maximum Distance Separable) 符号方式，ランダムな値をウェイクアップ ID としてビット不一致許容 ID マッチングを行うランダム ID 方式，最大距離分離符号をウェイクアップ ID として完全一致 ID マッチングを行う完全一致方式である．

受信待機電力の評価では，1 台の ECU が 1,000 台のセンサノードと通信を行う場合を想定した．ECU は 100 ms 毎に 1 台のセンサノードと通信を行うものとし，通信対象のセンサノードがウェイクアップするまで 10 ms 間隔でウェイクアップパケットを再送するものとした．

ウェイクアップモジュールは [6] で設計したものを想定した．通信周波数は距離による電波の減衰が比較的小さい 950 MHz 帯，変調方式は ASK，符号化方式はマンチェスタ符号，ボーレートは 40 kBaud である．許容エラービット数 t は 4 とした．最大センサノード数 $N = 1000$ と許容エラービット数 $t = 4$ を式 (1) に代入し，ウェイクアップ ID 長 n を 24 bit と決定した．24 bit のウェイクアップ ID に 9 bit のプリアンプルを付加したものをウェイクアップパケットとして用いることとした．

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る CC2520 [28] を想定した．CC2520 の受信待機電力は $55.5 \mu\text{W}$ である．データ通信モジュールが誤ウェイクアップした場合には 10 ms 間受信待機してからスリープ状態に戻るものとし，誤ウェイクアップした場合の電力消費を平均受信待機電力に含めた．

図 6 に SNR と平均受信待機電力の関係を示す．MDS 符号方式の平均受信待機電力はランダム ID 方式，完全一致方式よりも小さくなる事が分かる．特に SNR が 10 dB の場合には完全一致方式と比較して平均受信待機電力を約 60% 削減できる．

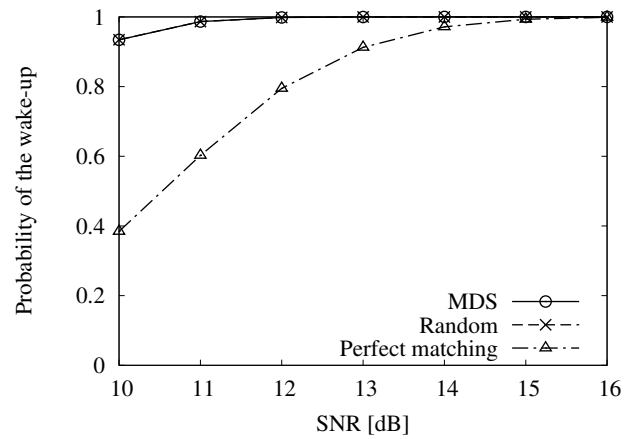


図 8 ウェイクアップ率

4.3 最大遅延時間

最大遅延時間の評価は，受信待機電力と同様に実測の通信環境データを用いてシミュレーションを行った．遅延時間は確率的な分布を示すため [29] で用いられた定義と同様に，信頼水準 99% における遅延時間の信頼区間の上限を最大遅延時間として評価した．

図 7 に SNR と最大遅延時間の関係を示す．MDS 符号方式とランダム方式の最大遅延時間はほぼ等しくなり，完全一致方式よりも小さくなる事が分かる．SNR が 10 dB の場合には完全一致方式と比較して最大遅延時間を約 85% 削減できる．

最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングの組み合わせによる受信待機電力と最大遅延時間の削減は，ウェイクアップパケットの再送回数の減少および誤ウェイクアップセンサノード数の減少に起因するものと考えられる．最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングの組み合わせによって，再送回数と誤ウェイクアップセンサノード数が減少することを確認するために，1 回のウェイクアップパケットの送信で通信対象のセンサノードをウェイクアップできる確率 (ウェイクアップ率) と，通信エラーにより誤ウェイクアップするセンサノードの割合 (誤ウェイクアップノードの割合) をシミュレーションによって評価した．

図 8 に SNR に対するウェイクアップ率を示す．MDS 符号方

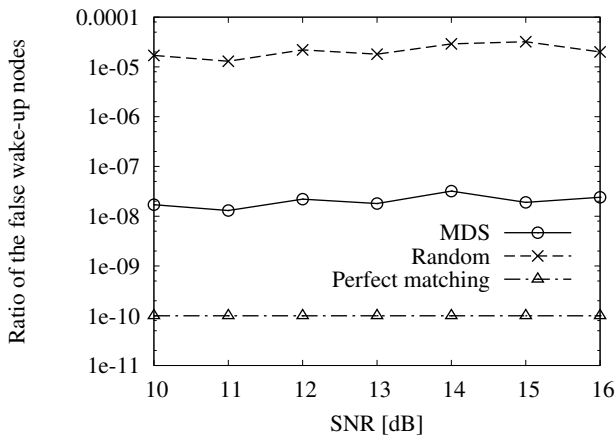


図9 誤ウェイクアップノードの割合

式とランダム ID 方式では、1 回のウェイクアップパケットの送信により高い確率で通信対象のセンサノードをウェイクアップできることが分かる。この結果、ウェイクアップパケットの再送回数は減少する。

図 9 に SNR に対する誤ウェイクアップノードの割合を示す。MDS 符号方式とランダム ID 方式は許容エラービット数 $t = 4$ であるビット不一致許容 ID マッチングを行うものの、MDS 符号方式における誤ウェイクアップノードの割合の方が 10^3 程度小さくなる。この結果、MDS 符号方式の受信待機電力の方がランダム ID 方式に比べて小さくなる。

5. おわりに

本稿では、車両内ウェイクアップ型無線通信の実現に向けて、最大距離分離符号とビット不一致許容 ID マッチングを組み合わせる通信エラー対策を示した。そして、回路の実装と実測した通信環境データを用いたシミュレーションを行い、小規模な回路によって最大遅延時間を増加させることなく受信待機電力の削減が可能となることを示した。現在、受信待機電力を最小化する許容エラービット数に関する検討を進めている。

謝 辞

本研究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し、シノプシス株式会社の協力で行われたものである。

文 献

- [1] G. Leen and D. Heffernan, "Vehicles without wires," *Comput. Contr. Eng. J.*, vol.12, no.5, pp.205–211, Oct. 2001.
- [2] W. Ye, F. Silva, and J. Heidemann, "Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling," *Proc. ACM Conf. Embedded Netw. Sensor Syst. (SenSys)*, pp.321–334, Oct./Nov. 2006.
- [3] L. Gu and J.A. Stankovic, "Radio-triggered wake-up capability for sensor networks," *IEEE RTAS*, pp.27–36, 2004.
- [4] S. Mark and G. Boeck, "Ultra low power wakeup detector for sensor networks," *IEEE IMOC 2007*, pp.865–868, 2007.
- [5] J. Ansari, D. Pankin, and P. Mähönen, "Radio-triggered wake-ups with addressing capabilities for extremely low power sensor network applications," *Int. J. Wireless Inf. Netw.*, vol.16, no.3, pp.118–130, 2009.
- [6] 瀧口貴啓, 石田繁巳, 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無線通信システムの消費電

力評価," *信学技報*, RCS2009-254, pp.269–274, 2010.

- [7] CAN in Automation (CiA), "Controller area network (CAN)," specification. <http://www.can-cia.org/>.
- [8] LIN Administration, "Local interconnect network (LIN)," specification. <http://www.lin-subbus.de/>.
- [9] FlexRay Consortium, "Flexray," specification. <http://www.lflexray.com/>.
- [10] C.-Y. Wan, A.T. Campbell, and L. Krishnamurthy, "PSFQ: A reliable transport protocol for wireless sensor networks," *Proc. ACM Int. Workshop on Wireless Sensor Netw. Appl. (WSNA)*, pp.1–11, Sep. 2002.
- [11] F. Stann and J. Heidemann, "RMST: Reliable data transport in sensor networks," *Proc. IEEE Int. Workshop on Sensor Netw. Protocols Appl.*, pp.102–112, May 2003.
- [12] H. Zhang, A. Arora, Y.-r. Choi, and M.G. Gouda, "Reliable bursty convergecast in wireless sensor networks," *Proc. ACM Int. Symp. Mobile Ad Hoc Netw. Comput. (MobiHoc)*, pp.266–276, May 2005.
- [13] B. Liu, F. Ren, C. Lin, and Y. Ouyang, "Performance analysis of retransmission and redundancy schemes in sensor networks," *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp.4407–4413, May 2008.
- [14] IEEE Standards Association, "IEEE standard for local and metropolitan area networks—specific requirements: Part 11 (IEEE 802.11-2007)," Jun. 2007. <http://standards.ieee.org/>.
- [15] ZigBee Alliance, "ZigBee 2007 specification," Oct. 2007. <http://www.zigbee.org/>.
- [16] R.W. Hamming, "Error detecting and error correcting codes," *Bell System Technical Journal*, vol.29, pp.147–160, 1950.
- [17] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Information Theory*, vol.8, pp.21–28, 1962.
- [18] A. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm," *IEEE Trans. Information Theory*, vol.13, pp.260–269, 1967.
- [19] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes," *IEEE ICC*, vol.2, pp.1064–1070, 1993.
- [20] I.S. Reed and G. Solomon, "Polynomial codes over certain finite fields," *Journal of SIAM*, vol.8, no.2, pp.300–304, 1960.
- [21] E.N. Gilbert, "A comparison of signalling alphabets," *Bell System Technical Journal*, vol.31, pp.504–522, 1952.
- [22] R.R. Varshamov, "Estimate of the number of signals in error correcting codes," *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, vol.117, pp.739–741, 1957.
- [23] R.M. Roth and G. Seroussi, "On generator matrices of MDS codes," *IEEE Trans. Information Theory*, vol.31, pp.826–830, 1985.
- [24] M. Blaum, J. Brady, J. Bruck, and J. Menon, "EVENODD: An efficient scheme for tolerating double disk failures in RAID architectures," *IEEE Trans. Comput.*, vol.44, no.2, pp.192–202, Feb. 1995.
- [25] M. Blaum and R.M. Roth, "On lowest density MDS codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.45, no.1, pp.46–59, 1999.
- [26] L. Xu and J. Bruck, "X-Code: MDS array codes with optimal encoding," *IEEE Trans. Information Theory*, vol.45, pp.272–276, 1999.
- [27] Synopsys, "Design Compiler," <http://www.synopsys.com/>.
- [28] Texas Instruments, "Second generation 2.4 GHz zigbee/ieee 802.15.4 RF transceiver," datasheet. <http://www.ti.com/>.
- [29] H.-M. Tsai, W. Viriyasitavat, O.K. Tonguz, C. Saraydar, T. Talty, and A. Macdonald, "Feasibility of in-car wireless sensor networks: A statistical evaluation," *Proc. IEEE Commun. Soc. Conf. Sensor, Mesh and Ad Hoc Commun. and Netw. (SECON)*, pp.101–111, Jun. 2007.