マルチサブキャリア多元接続を用いた構造ヘルスマニタリングにおける

SDR 処理遅延実測システムの開発

中 野 遥 平*・藤 原 辰 起**・三 次 仁***

川喜田 佑 介**・市 川 晴 久**

Development of SDR Processing Delay Measurement System for
Structural Health Monitoring Using Multi-subcarrier Multiple Access

Yohei NAKANO*, Tatsuki FUJIWARA**, Jin MITSUGI***,
Yuusuke KAWAKITA** and Haruhisa ICHIKAWA**

The authors propose to perform wireless and battery-less monitoring using multi-subcarrier multiple access for Structural health monitoring. software defined radio (SDR) is used in the monitoring, processing delay is inevitable, so we developed a system that actually measures the processing delay.

Key Words: structural health monitoring, multi-subcarrier multiple access, SDR

1. はじめに

近年, 高度経済成長期に大量に建設された橋梁やトンネルなどの社会インフラの老朽化が進んでおり, それらを点検するために多大な人員・時間が必要と考えられる. 点検の効率化のため, センサを用いて構造物を監視する構造ヘルスマニタリングの研究が進められている^{1)~3)}. 対象となる構造物の大きさや耐用年数を考慮すると, センサ端末のワイヤリングや電池交換は現実的でないため, センサ端末はワイヤレスかつバッテリーレスであることが望ましい.

この問題に対して, パッシブ RFID のシステムとセンサを組み合わせた無線センサ端末の開発⁴⁾が行なわれている. パッシブ RFID のシステムではリーダー/ライターから RF タグへ給電・コマンド用のキャリアを送信し, RF タグから変調した信号を反射することで RF タグ側に電源の不要な通信を行なうことができる. また, 複数の RF タグを用いて非同期ストリーミング通信を実現するマルチサブキャリア多元接続^{4), 5)}の研究が進められている. マルチサブキャリア多元接続では, RFID の国際標準規格⁶⁾で一つしか用いられないサブキャリアを複数用いることで, センサ間の時刻同期不要な多地点同期センシングを行なうことができる. ここで, このマルチサブキャリア多元接続を構造ヘルスマニタリングへ適用するこ

Fig. 1 Subcarrier channel allocation and interference caused by harmonics

とを考える. 構造ヘルスマニタリングを用いた構造物の劣化診断には, 固有振動数の変化を利用するもの⁷⁾など入力 (加振信号) と出力 (観測信号) に時刻同期を必要とするモニタリング法がある. マルチサブキャリア多元接続ではセンサ信号の出力に SDR (Software Defined Radio) の処理遅延が避けられず, 処理遅延を推定しないと入力と出力の時間同期が不可能となる. そこで, 本研究では, SDR の処理遅延を定量的に検討し, 実測可能であることをシステム開発を通して明らかにすることを研究課題とした. 以降に本論文の構成を示す. まず 2 章では, マルチサブキャリア多元接続の概要と SDR の処理遅延について説明する. 3 章では, SDR 処理遅延実測システムと実測結果について述べた後, 4 章で結論を述べる.

2. マルチサブキャリア多元接続と SDR 処理遅延

マルチサブキャリア多元接続はパッシブ RFID の通信方式であるサブキャリア方式を発展させ, 複数のサブキャリアを用いて複数の RF タグと周波数分割多元接続 (FDMA: Frequency-Division Multiple Access) を行なう方式である. RFID の国際標準規格⁶⁾における多元接続は, 複数の RF タグからのサブキャリアを同一の周波数上において時間で分割する時分割多元接続 (TDMA: Time Division Multiple Access)

* 電気通信大学情報理工学部 調布市調布ヶ丘 1-5-1

** 電気通信大学大学院情報理工学研究科 調布市調布ヶ丘 1-5-1

*** 慶應義塾大学環境情報学部 藤沢市遠藤 5322

* Faculty of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

** Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

*** Faculty of Environment and Information Studies, Keio University, 5322 Endo, Fujisawa

(Received March 30, 2017)

(Revised July 24, 2017)

Fig. 2 Configuration of SDR processing delay measurement system

を用いている。TDMA を用いて多地点センシングは可能であるが、サンプリング同期は保証されない。一方マルチサブキャリア多元接続では、複数の RF タグが複数のサブキャリアを使用することで、複数の RF タグからの信号の時間差はなくなり多地点同期センシングが可能となる。一般に、RF タグからのサブキャリアには不要発射となる高調波の発生が原理的に避けられない。サブキャリアを複数使用するマルチサブキャリア多元接続では、Fig. 1 で示すようなサブキャリアの高調波による干渉が発生するおそれがある。サブキャリアチャンネルの割り当てが既知であれば、受信したサブキャリアの基本波から高調波のレプリカ信号を生成し、被干渉のサブキャリアから干渉を除去（逐次干渉除去）することで信号を復元している。逐次干渉除去サブキャリアチャンネルの割り当てでは、センシング対象ごとに設置するセンサ端末の数などが異なり、センシング対象ごとに干渉除去処理の変更に対応できる SDR の使用が望ましい。本研究における SDR の処理は FPGA (field-programmable gate array) と PC 上での処理のことを指す。SDR の処理遅延は、SDR 処理を実行する計算機の性能や処理対象となるサブキャリア数によって異なる。以上のように、マルチサブキャリア多元接続を用いて入力と出力の時間同期が必要なモニタリング法を実現するためには、モニタリングに先立って SDR 処理遅延を推定する必要がある。

3. SDR 処理遅延実測システムと実測結果

モニタリング対象と SDR 処理を実行するシステムごとに処理遅延が一定であり、その処理遅延が簡便に測定可能であればモニタリングに先立って校正が可能となる。そこで、SDR の処理遅延を実測できることを確認し、処理遅延の変動について確認するために、Fig. 2 に示すようなシステムを作成した。本システムは、モニタリング対象を模擬した片持ち梁に加速度センサとマルチサブキャリア多元接続に対応した試作センサ端末を片持ち梁の下から 15 cm 程度の箇所に無線と有線のセンサをできるだけ近接に並べて取り付け、加速度が十分に

Fig. 3 Example of acquired sensor data

Fig. 4 Example of measurement processing delay

取得できる箇所にセンサを配置した。モニタリング対象には JIS1 級、1050×35×15 (mm)、425 g、ステンレス SUS420J2 製のシンワ測定製のものさしを使用した。加速度センサには重さ 5 g の MMA7361 を組み込んだ加速度センサモジュールを使用し、重さ 14 g の試作センサ端末内には同様の加速度センサが組み込まれている。片持ち梁の上から 30 cm 程度の箇所を 2 回ハンマリングした際の加速度を有線（加速度センサ）と無線（試作センサ端末）の場合で測定を行ない、その二つの信号を比較し処理遅延を算出するものとなっている。有線（加速度センサ）と無線（試作センサ端末）を同じ箇所に設置しない場合と設置箇所が本実験の箇所以外の場合における校正精度の違いに関しては未検討である。これは、試作センサ端末では加速度センサが内部に組み込まれており、一つのセンサから有線と無線のセンシングデータを同時に送信できないことから、今回の実測では有線と無線のセンサをできるだけ近接に設置する形をとった。また有線の加速度センサの重さと、有線の加速度センサと試作センサ端末との設置位置の違いにより、有線の加速度センサを用いる場合と試作センサから有線と無線で出力した場合では校正精度に違いがある恐れがある。実際の構造物をモニタリングする場合は、モニタリングに先立って複数ある試作センサ端末の一つに有線接続用のケーブルを取り付け同様に処理遅延を算出することで校正を行なう。

つぎに、SDR 処理遅延の算出方法について述べる。Fig. 3 は取得した加速度センシング信号の例である。有線信号と

Fig. 5 Distribution of measurement processing delay

SDR 処理後に出力される無線信号の波形のピークを比較することで、 a = スケール (SDR 内でのループ処理によるピーク間の伸び) と b = オフセット (SDR が処理を開始するまでの時間) を求め、 Y = 処理遅延時間、 X = SDR 処理なしの時間とすると $Y = aX + b$ で表わすことができ処理遅延を算出できる。スケールは SDR 処理におけるループ処理で直ちに推定可能であるので $a = 1$ となる処理を行なった。スケールを $a = 1$ に固定した実測結果の例を Fig. 4 に示す。それぞれの実測結果でスケール a が 1 になるように SDR 内でのループ処理によるピーク間の伸びがなくなるように設定した。したがって有線と無線のピーク間の時間差が 0 になるようにした。Fig. 3 では有線信号と無線信号のピーク間の時間を比較すると約 9 倍になっているが、Fig. 4 では有線と無線のピーク間の時間の差はないため、有線のピークと無線のピークの時間差 (処理遅延) から b を算出できる。

さらに、SDR 処理遅延の変動について述べる。SDR 処理遅延を 50 回実測した結果を Fig. 5 に示す。全 50 回の実測においても同様にスケール a が 1 になるように設定を行ない、有線と無線のピーク間の時間差が 0 になるようにした。平均で約 345 ms の遅延が生じ、その変動は 10.1% に収まることわかった。2 点 (240 ms, 164 ms) あるはずれ値に関しては SDR 処理を実行する PC の OS におけるタスクスケジューリングなどに起因すると考えられるが、細かい PC 内部の処理の内訳は未検討である。今回使用したモニタリング対象と SDR 処理を実行するシステムでは、10.1% 程度の変動で処理遅延がある。ほかのモニタリング対象では設置されるセンサの数に依存して SDR 処理遅延時間は異なる恐れがあるが、モニタリングに先立って SDR 処理遅延を推定できることを実験的に確認した。どの程度の変動が許容されるかは入力と出

力の時間同期が必要となるモニタリング法によって異なるため引き続き検討が必要である。

4. む す び

本論文では、マルチサブキャリア多元接続を構造ヘルスモニタリングに適用する際に課題となる SDR 処理遅延について論じた。マルチサブキャリア多元接続では SDR 処理遅延の発生が避けられず、入力と出力の時間同期が必要となるモニタリング法を使用する際に SDR 処理遅延の推定が必要となる。SDR 処理遅延を実測するシステムを作成しその処理遅延を実測した結果、モニタリング対象と SDR 処理を実行するシステムごとが同一であれば、同程度の処理遅延が発生することを明らかとした。許容できる処理遅延の変動はモニタリング法によって異なるが、モニタリングに先立って試作センサ端末の一つに有線接続用のケーブルを取り付け、モニタリング対象を一度ハンマリングするだけで簡単に校正ができることをシステム開発を通して明らかにした。

謝辞 本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 155003007) の委託を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser and M. Turon: Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks, 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 254/263 (2007)
- 2) 倉田成人: 建築構造物と社会インフラのモニタリング, 計測と制御, **55-3**, 197/202 (2016)
- 3) 藤野陽三: 安全なインフラに向けての維持管理と SIP での取り組み, 計測と制御, **55-2**, 117/122 (2016)
- 4) Y. Igarashi, N. Rajoria, J. Mitsugi, Y. Kawakita and H. Ichikawa: A performance analysis of interference rejection technique in multi-subcarrier multiple access, 2015 IEEE International Conference on RFID-TA, 33/38 (2015)
- 5) N. Rajoria, Y. Igarashi, J. Mitsugi, Y. Kawakita and H. Ichikawa: Comparative Analysis on Channel Allocation Schemes in Multiple Subcarrier Passive Communication System, IEICE Transactions on Communications, **E98-B-9**, 1777/1784 (2015)
- 6) GS1: EPC radio-frequency identity protocols specification for RFID air interface protocol for communications at 860 MHz - 960 MHz version 2.0.0 ratified, http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhf1g2.2.0.0_standard_20131101.pdf
- 7) 奥松, 岡林, 田代, 要谷, J.B. Ahmad: 橋梁遠隔モニタリングシステムによる鋼ランガートラス橋の固有振動数の推移観測, 構造工学論文集 A, **53A**, 844/852 (2007)