

サブキャリア変調波を用いた長距離・超低消費電力無線タグ

北吉 均[†] 澤谷 邦男[‡]

[†] 技術コンサルタント 〒989-3124 宮城県仙台市青葉区上愛子字街道 59-49

[‡] 東北大学工学部 〒980-08579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†] kitayoshi@pep.ne.jp, [‡] sawaya@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし サブキャリア多値位相変調応答波を用いたウェアラブル無線タグを提案し、試作・評価した結果について述べている。長距離化及び超低消費電力化のための技術として、フレキシブルなキャビティ付きスロットアンテナ、スタブ共振昇圧回路、低消費電力かつ誤動作の少ないウェイクアップ動作のパルス符号化鍵検出回路、及びサブキャリア多値位相変復調回路を導入している。試作したセンサ無線タグは、1秒当たり20回の連続測距センサ無線タグ、1秒当たり350回の連続サンプリングで動作する3軸加速度センサ無線タグ及び心電計センサ無線タグの3種類であり、いずれも厚み3mm程度で柔軟く衣服との一体化が可能である。また、内蔵する3Vボタン電池の連続動作時の消費電流はそれぞれのタグにおいて10 μ A、633 μ A及び583 μ Aであり、従来のアクティブ無線タグと比較して消費電力を1/10～1/100に削減している。さらに、ARIB STD-T81規格で動作し2.45GHz帯3mW/MHzリーダ出力にて35mまでの読取り動作を確認している。

キーワード 無線タグ、低消費電力、ウェアラブルアンテナ、サブキャリア多値位相変調、スタブ共振昇圧、パルス鍵検出回路

Advanced Low Power Long Distance RF-Tag Systems by Using Modulated Subcarrier Wave

Hitoshi KITAYOSHI[†] and Kunio SAWAYA[‡]

[†] Consultant of Engineering 59-49 Kaido, Kamiyashi, Aoba-ku, Sendai 989-3124 Japan

[‡] Faculty of Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579 Japan

E-mail: [†] kitayoshi@pep.ne.jp, [‡] sawaya@jecei.tohoku.ac.jp

Abstract Novel semi-passive sensor RF-tags for a low power consumption and a long reading range are proposed. Tags are composed of a sensor, a wearable cavity-backed slot antenna, a resonant short stub circuit for boosting the rectified DC voltage and a pulse key detector for the wake up operation. Subcarrier multilevel phase shift keying (MPSK) is employed for continuous data communications and distance measurement, is proposed. Experimental study of fabricated semi-passive RF-tags, i.e., tags for distance measurement, tri-axial acceleration sensor and electrocardiographic monitor, is presented, in which 35 m range response can be achieved in the 3mW/MHz ARIB STD-T81 reader at 2.45 GHz band. Current requirements of battery in these tags are 10 μ A (20sps), 633 μ A (350sps) and 583 μ A (350sps), respectively, which are much smaller than conventional active RF-tags.

Keyword RF-Tag, Low Power Consumption, Wearable Antenna, Subcarrier MPSK, Voltage Step Up Circuit by Resonant Stub, Pulse Key Detector

1. まえがき

ユビキタスセンサーネットワークを普及させるための課題として、設置場所や所持を意識させないセンサ端末の小形化、年単位の電池寿命の低消費電力・長寿命化、リアルタイム応答性能（センシング情報の即

時解析とセンシング情報の連携統合）が求められている[1]。

従来のセンサーネットワーク端末で研究開発が進められている ZigBee, Bluetooth, UWB 等の通信技術では、電池寿命の競争に伴ってリアルタイム応答性能

を犠牲にしたスリープ定期起動動作による低消費電力化が図られている．このようなセンサは気象環境のセンシング等のように 5 分間に 1 回の割合で通信が成立すれば十分な効果が期待できるシステムへの応用には有効であるが，ユビキタスセンサーネットワークの将来ビジョン[1]で掲げられている危険情報の察知・誘導や高齢者等の支援・見守りシステムではリアルタイム双方向性の実現が重要な課題となっている．

筆者らは，ICT 安心・安全な社会基盤の構築に貢献することを目的として，これまで提案してきたウェアラブルアンテナ[2]，低消費電力化及びリアルタイム双方向無線接続技術[3]を用いて，小形で超低消費電力の無線接続センサ端末及びセンサネットワークシステムの開発を進めてきた．本報告は，サブキャリア多値位相変調応答波を用いたウェアラブル無線タグを試作・評価した結果について述べる．提案するセンサ無線タグは，セミパッシブ方式であり，長距離化及び超低消費電力化のための技術として，フレキシブルなキャビティ付きスロットアンテナ，低消費電力で高い受信感度を得るためのスタブ共振昇圧回路，低消費電力かつ誤動作の少ないウェイクアップ動作のパルス符号化鍵検出回路，及びサブキャリア多値位相変復調回路を導入した．試作したセンサ無線タグは測距センサ，3 軸加速度センサ，及び心電計センサの 3 種類である．なお，提案技術ではセンサ端末の通信手段として電波の散乱（受信・変調・放射）を利用するセミパッシブ方式を用いているため，センサ端末は電波放射源が不要であり，これを所持したままでの航空機等への搭乗にも問題ないという特徴を有している．

2. センサ無線タグ端末の基本構成

2.1. アンテナ

タグ端末を設置・所持しやすくするためには，フレキシブルな構造のウェアラブルアンテナの導入が望ましい．田中らは導電性布を用いてウェアラブルパッチアンテナの試作・評価している[7]．

筆者らは，ほぼ同じ大きさと利得をもち，安価で製作可能なウェアラブルアンテナとして，図 1 に示すように袋状アルミ蒸着フィルムに高発泡ポリプロピレンシートを内装したフレキシブルキャビティ付き薄型スロットアンテナを開発した[2]．このアンテナは，安価に製作できるばかりでなく， $\lambda/4$ 長の空洞共振を利用しているために人体装着時の厚み変化等による特性劣化も軽減されるという特徴を有している．図 1 に示すウェアラブルアンテナは 2.45GHz 帯用であり，サイズ 6cm×12cm，厚み 3mm で柔らかく人体等に密着して使用しても性能劣化が無い．また，実験評価のため集積化してはいないが，このアンテナにはセンサ及び受信

応答回路が接続されており，スタブ共振昇圧回路，パルス符号化鍵検出回路， μ -CPU，3 軸加速度センサ及び電池が搭載されている．

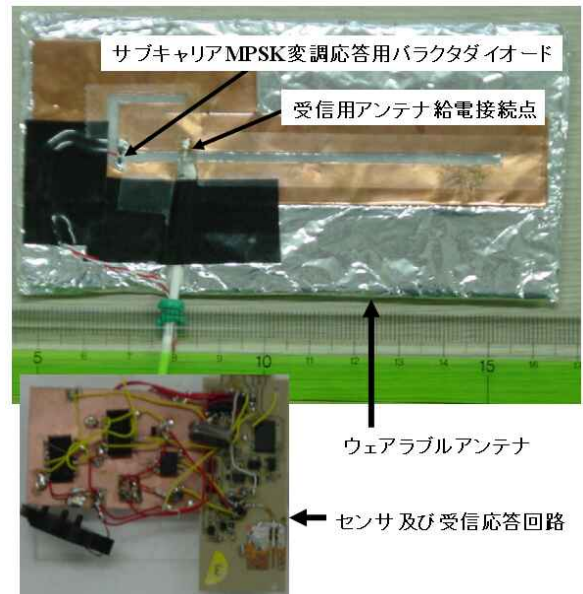


図 1 提案するウェアラブルセンサ無線タグ端末

2.2. 整流回路とウェイクアップ回路

パッシブ型及びセミパッシブ型の無線タグ端末の受信回路には RF 信号から ASK 復調信号を得るために整流回路が組み込まれる．これまで消費電力を少なくするために整流素子を組み合わせた倍圧整流回路や積層形コッククロフト・ウォルトン整流回路が用いられてきた[8], [9]が，受信周波数を選択できないために雑音の影響を受けやすいという欠点を有している．また，受信感度を上げるためには整流素子数を増やす必要があるが，これは順方向電圧降下と出力インピーダンスの増加によって RF-DC 変換効率の低下と応答周波数の低下が避けられないという欠点もあり，実際の入力感度は -10dBm 程度で通信距離は 10m 以下であった[6]．一方，アクティブ型[5]では RF フィルタ及び RF プリアンプを用いることにより受信周波数を選択し，かつ -70dBm 程度の高い受信感度を得ている．しかしながら，この方法では受信時における消費電力が 60mW と極めて大きいという欠点があった．

筆者らはスタブ共振昇圧方式を用いた高感度低消費電力受信回路を提案した[3]．図 2 にこの受信回路の構成を示す．この回路で，アンテナで受信された RF 信号電圧はコンデンサ C1 (0.15pF) と $\lambda g/4$ ショート・スタブの直列共振によって 10 倍以上に昇圧されて C2 を経由してダイオード D3 に供給される．D3 は，D4 より僅かに高く順バイアスされているために RF 入力が無い場合にはそれぞれの電位差は $VD3 > VD4$ とな

対する応答リアルタイム性を実現することができる。

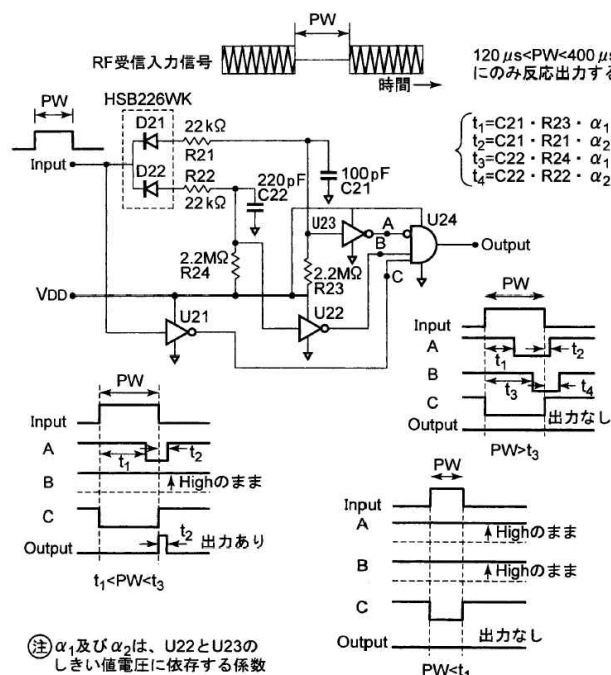


図 3 無線タグ端末用ウェイクアップ回路の構成例と動作

2.3. サブキャリア多値位相変調方式

筆者らは、センサ無線タグ端末側の応答信号として、質問キャリアに対するサブキャリアを生成し、多値位相変調 (MPSK) する方式を提案した[3]。この方式は、アンテナに装荷したバラクタダイオード (図 1) に加えるバイアス電圧を周波数 f_s で周期的に変化させてサブキャリア信号を発生させると共に、その位相を制御 μ -CPU によって変化させることにより実現できる。サブキャリア変調に用いるバラクタダイオードにおける電力消費は $1 \mu\text{W}$ 以下でほぼ無視できる。また、図 2 に示すように多値位相変調用のサブルーチンプログラムを制御 μ -CPU (U2) 内に組み込み、Dout 端子から方形波出力するだけで変調できる。一方、受信側のタグ

リーダでは、図 4 に示すように質問信号のキャリアを用いて受信信号を周波数 f_s の複素サブキャリア信号に変換した後、複素 DFT 処理することによってサブキャリア信号のデータを復調する。したがって、質問キャリア信号の位相雑音が受信側で相殺されるために、精度の高い位相検出が可能である。また、位相変調方式は雑音にも強く、大量連続データの通信に適している。さらに、タグとリーダ間の測距については、変調周波数 f_s の応答信号の位相を固定してリーダ側の周波数ホッピング定常波 (FH-CW) を用いた受信応答の複素周波数特性から算出することができる。

3. 無線タグリーダの構成

図 4 に、提案するタグリーダの構成を示す。この装置は、ARIB STD-T81 規格で動作し、送信質問キャリア周波数帯域 2.400-2.483GHz (FH step 390kHz)、送信電力 3mW/MHz、送受信共用アンテナの動作利得 6dBi である。無線タグからは、リーダから送信した質問キャリアに対して $\pm f_s$ だけ周波数オフセットしたサブキャリア信号を生成し MPSK でデータを返送する。リーダで受信したタグからの応答サブキャリア信号は、質問キャリア信号で直交検波し $I(t)$ 及び $Q(t)$ として $\pm f_s$ の複素信号に変換した後、 $+f_s$ 成分のみを複素 DFT 処理してタグからの返送データの復調を行っている。ここで、タグからの返送データは、4 値 PSK や 16 値 PSK を用いており、復調において IQ 直交検波信号の直交性誤差が符号誤り率に大きく影響することになるが、質問キャリア周波数帯での 90° 移相やミキサでの位相及び変換利得の偏差を正確に調整することは極めて難しい。

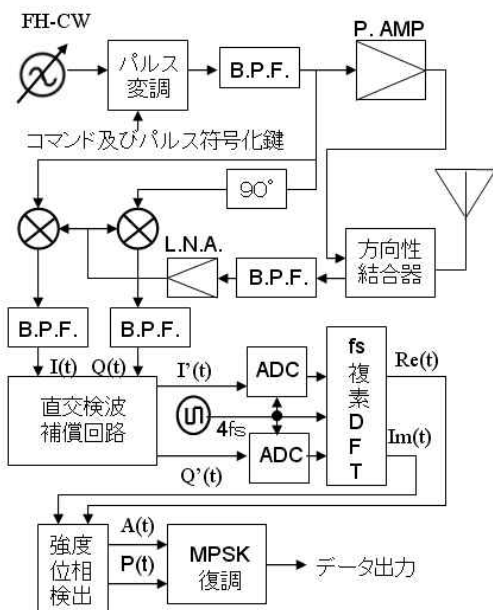


図 4 提案する無線タグ用リーダの構成

図 5 は、筆者らが開発したサブキャリア復調回路である。この回路では、IQ 検波信号を周波数 f_s においてアナログで直交検波補償し、ADC により $4f_s$ サンプリングで量子化した信号をシフトレジスタ D に取り込みながら、加減算処理によって f_s 信号 1 周期分づつ複素スライディング DFT 積分を行い復調結果 ($Re(t)+jIm(t)$) を得る。この回路では、入力信号 $I(t)$ は固定して、 $Q(t)$ 信号のみスケール k 及び回転 θ を与えることによって直交検波の誤差を補償している。また、この回路でスケール k 及び回転 θ は、 $Rd=Rb/(k\cos\theta)$ とし、 $\Delta=(1-\sin\theta)/2$ とすれば良い。なお、図中の記号 -1 は符号反転演算を示す。

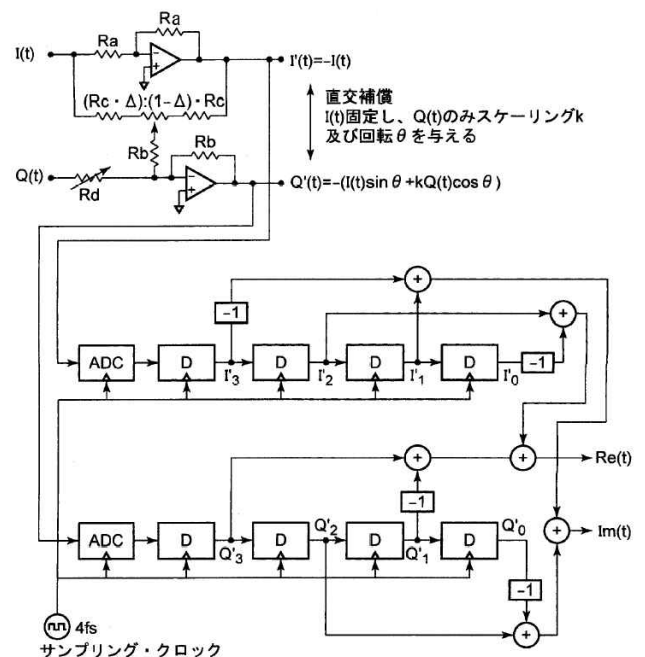


図 5 IQ 信号の直交性補償と f_s 複素 DFT 処理回路

4. 各種センサ搭載無線タグの評価実験結果

図 1 に示したウェアラブル無線タグ端末に各種センサを搭載し、図 4 に示した無線タグリーダを用いて遠隔観測した評価実験結果及び実験に使用した無線タグの構成について述べる。

4.1. 測距センサ

図 6 に、室内における無線タグとリーダ間の測距実験結果を示す。ただし、無線タグとリーダ間の距離は 40cm と 140cm である。ここで測距は、図 4 に示すタグリーダから質問キャリア 2.400-2.483GHz (FH step 390kHz) を連続送信して無線タグ側で無変調サブキャリア信号を返送し、リーダ側でこれを受信復調することによって得られた 83MHz 帯域幅の周波数応答特性をゼロ充填逆フーリエ変換することにより得られる。

また、横軸は、時間 τ に光速 c を掛けた距離である。観測された距離は、時間軸での 83MHz 帯域制限を受けたインパルス応答に対応し、無線タグとリーダ間の往復の距離に対応する。測距センサ無線タグでは、返送する無変調サブキャリア信号の位相安定性が重要であり、サブキャリア生成用に時計として使用する 32.768kHz の水晶発振器 (SG-3030JF) の出力をタグアンテナに装荷したバラクタダイオードに接続し、無線タグが ID 指定された測距コマンドを受信した場合に、約 40ms 幅のバースト無変調サブキャリアを返送するようにした。発振器の消費電流は 2 μ A 以下でコマンド受信制御 μ -CPU は、測距バースト応答中スリープ状態としているために、無線タグ端末全体での連続動作時消費電流は 10 μ A 以下であった。図 6 から分かるように、この装置では 10cm 程度の測距精度が得られている。

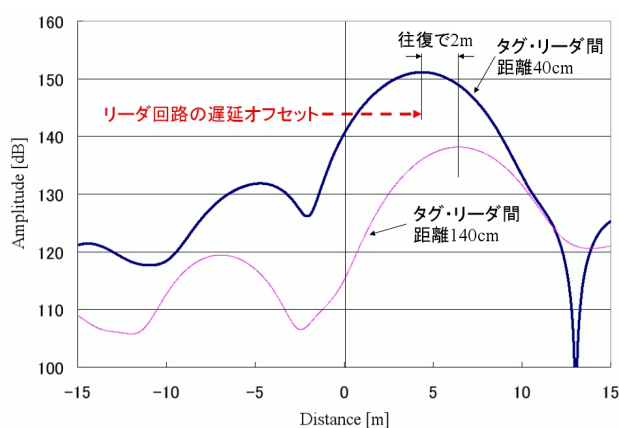


図 6 無線タグとリーダ間の周波数応答特性に対するゼロ充填 IFFT 結果

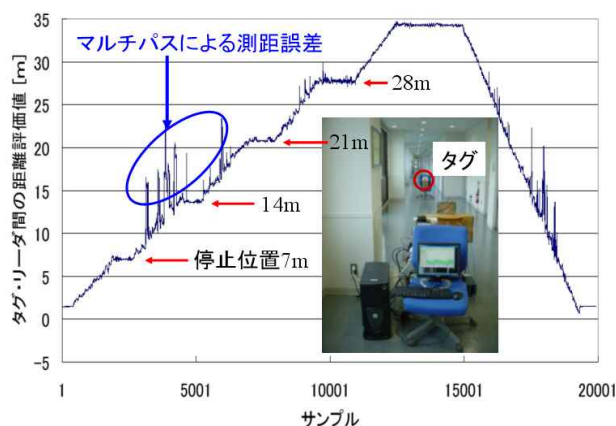


図 7 無線タグとリーダ間の測距実験結果

図 7 は、試作した無線タグ測距システムの評価結果と実験の様子を示す写真である。この実験では、無線タグをキャスタ付き椅子に乗せて廊下を連続移動し、

リーダ側では 50ms 間隔でタグとリーダ間の測距を行い連続記録した。なお、IFFT 処理は PC でリアルタイムに行っており、オフセット距離を考慮し片道換算した結果を図 7 に示している。観測した廊下の柱の間隔は 7m あり、行きは柱位置ごとに一旦移動を停止し、帰りは連続移動して評価した。図 7 から無線タグとリーダ間距離 1-35m 範囲においてほぼ正確な測距が行われていることがわかる。距離 10-15m の範囲では不連続ではあるが比較的大きな測距誤差が確認できる。これは、比較的大きな反射面を有する柱によって生じたマルチパスが原因であると考えられ、今後改善を図る必要がある。

4.2. 3軸加速度センサ

センサ無線タグ端末を手に持って揺すったときに、タグ端末に搭載した 3 軸加速度センサによって測定された結果を遠隔表示した例を図 8 に示す。ただし、縦軸の感度は 0.3V/g である。この無線タグ端末では、3 軸加速度センサとして ADXL330 を用いており、x 軸、y 軸、z 軸それぞれの出力を直接 10bit 分解能で AD 変換し、軸情報とともに 1 秒間に 350 回のサンプリング速度でリーダへ連続データ返送している。350sps の連続データ送信時のセンサ無線タグ端末全体での内蔵ボタン電池 (3V) の消費電流は 633 μ A であり、うち ADXL330 の消費電流は 320 μ A であった。

この例で示したように、提案するセンサ無線タグシステムでは、測定データとともにデータ ID を一緒にパケットで通信する方式を用いているために、複数センサを搭載する複数センサ無線タグ端末のデータ収集を一括して行うこともできる。

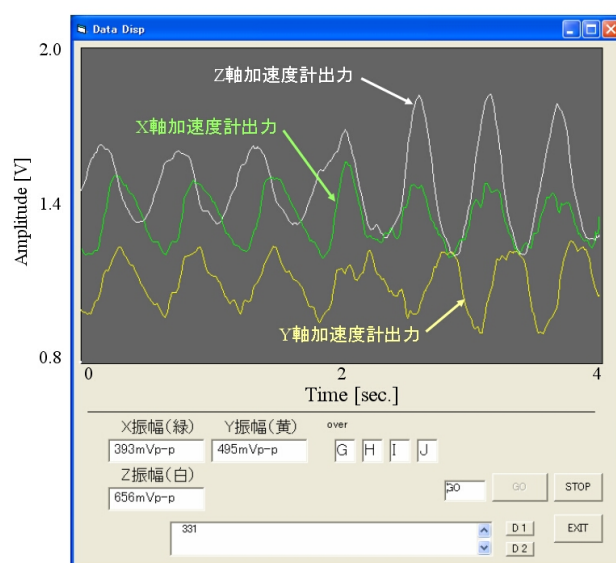


図 8 3 軸加速度センサを搭載した無線タグの読取り結果

4.3. 心電計センサ

図9に心電計センサを搭載した無線タグ端末を用いた遠隔測定表示例を示す。この無線タグ端末は、220倍の電圧利得を有する差動センサアンプと75Hzまでの低域通過フィルタ及び10bit分解能のAD変換器を有しており、センサアンプとセンサ電極はJIS規格に従って時定数3.5秒の容量性結合を用いている。リーダ側では、観測波形のオフセットドリフト除去や50Hz誘導ノイズの除去をPCでFIRデジタルフィルタ処理して表示している。図9の $\Delta R-R$ 間隔は、心電図において隣り合うインパルスピーク間隔の時間変動幅を示す数値であり、%RR50は、この値が50msを越える割合を示す数値である。%RR50の数値は、睡眠時無呼吸症候群との相関が高く[10]、本提案の装置を利用することによって、被験者の負担が少なく比較的容易に連続して診断や治療効果の確認ができるものと考えられる。なお、350spsでの連続データ通信時におけるこのセンサ無線タグ端末全体での3V内蔵ボタン電池の消費電流は583 μ Aであった。

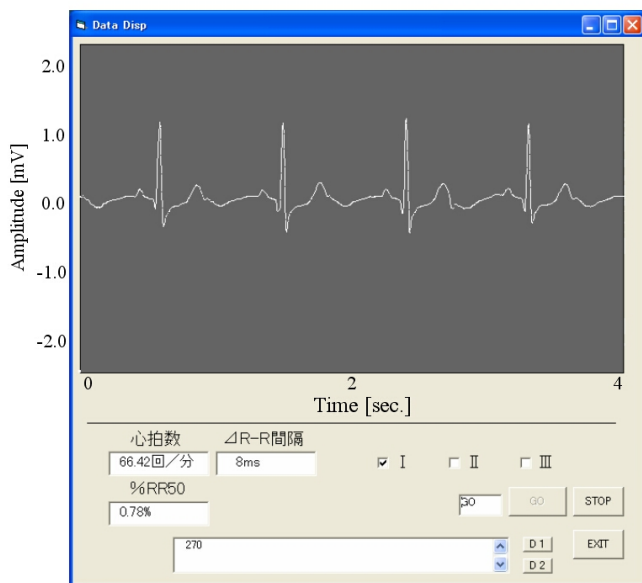


図9 心電計センサを搭載した無線タグの読取り結果

5. むすび

サブキャリア多値位相変調応答波を用いたウェアラブル無線タグを提案し、試作して評価した結果について述べた。長距離化及び超低消費電力化のための技術として、フレキシブルなキャビティ付きスロットアンテナ、低消費電力で高い受信感度を得るためのスタブ共振昇圧回路、低消費電力かつ誤動作の少ないウェイクアップ動作用のパルス符号化鍵検出回路、及びサブキャリア多値位相変復調回路について述べた。試作したセンサ無線タグは、1秒当たり20回の連続測距セ

ンサ無線タグ、1秒当たり350回の連続サンプリングで動作する3軸加速度センサ無線タグ及び心電計センサ無線タグの3種類であり、いずれも厚み3mm程度で柔らかく衣服との一体化が可能である。また、内蔵する3Vボタン電池の連続動作時の消費電流はそれぞれのタグにおいて10 μ A、633 μ A及び583 μ Aであり、測距を目的としたUWB方式のアクティブ無線タグ[4]やZigBee方式のアクティブセンサ無線タグ[5]と比較して消費電力を1/10～1/100に削減するものである。端末における消費電流の多くはセンサ部で消費されており、電源の低電圧化によって更なる低消費電力化・長寿命化が可能であると考えられる。さらに、これらのセンサ無線タグはARIB STD-T81規格で動作し2.45GHz帯3mW/MHzリーダ出力にて35mまでの読取り動作を確認した。

本報告で示した実験結果は全て2.45GHz帯の無線LANが利用されている環境で行ったものであり、本提案装置がリアルタイムセンサーネットワークシステムに実際に利用可能であると考えられる。

文 献

- [1] 総務省, “ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて (最終報告)”, http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806_4_b2.html/, Jul. 2004.
- [2] 北吉, 澤谷, “柔らかい薄型キャビティ付きスロットアンテナ,” 2006年信学ソ大, B-1-96, Sep. 2006.
- [3] 北吉, 澤谷, “セミパッシブ無線タグの長距離化に関する検討,” 2007年信学総大, B-5-20, Mar. 2007.
- [4] YRP ユビキタスネットワークング研究所および日立製作所, “UWB Dice”, <http://www.t-engine.org/news/pdf/TEP060704-u01.pdf/>, 2006.
- [5] Dust Networks 社, “SmartMesh”, <http://www.dustnetworks.com/>.
- [6] 経済産業省, “響プロジェクト報告書,” http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/tag/hibikil.pdf/, 2006.
- [7] M. Tanaka and J.H. Jang, “Wearable Microstrip Antenna for Satellite Communications,” IEICE Trans. Commun., vol. E87-B, no. 8, pp. 2066-2071, Aug. 2004.
- [8] T. Umeda et al., “A 950-MHz Rectifier Circuit for Sensor Network Tags With 10-m Distance,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 41, no. 1, pp. 35-41, Jan. 2006.
- [9] 森ら, “UHF帯RFIDの課題と対策(7),” 2006年信学総大, CBS-1-6, Mar. 2006.
- [10] 根本, “睡眠時無呼吸症候群のホルター心電図R-R間隔変動について,” 第34回医学検査学会, http://www.tsuboi-hp.or.jp/main/HTML/PART/kensaHP/kensabu_study/0205SAS_Holter.htm/, May 2002.