

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6109964号  
(P6109964)

(45) 発行日 平成29年4月5日 (2017.4.5)

(24) 登録日 平成29年3月17日 (2017.3.17)

(51) Int. Cl. F I  
H03M 7/30 (2006.01) H03M 7/30 Z

請求項の数 7 (全 23 頁)

|               |                              |           |                                 |
|---------------|------------------------------|-----------|---------------------------------|
| (21) 出願番号     | 特願2015-556771 (P2015-556771) | (73) 特許権者 | 504137912                       |
| (86) (22) 出願日 | 平成26年12月25日 (2014.12.25)     |           | 国立大学法人 東京大学                     |
| (86) 国際出願番号   | PCT/JP2014/084427            |           | 東京都文京区本郷七丁目3番1号                 |
| (87) 国際公開番号   | W02015/105010                | (73) 特許権者 | 000005234                       |
| (87) 国際公開日    | 平成27年7月16日 (2015.7.16)       |           | 富士電機株式会社                        |
| 審査請求日         | 平成28年1月8日 (2016.1.8)         |           | 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号              |
| (31) 優先権主張番号  | 特願2014-1251 (P2014-1251)     | (74) 代理人  | 100089118                       |
| (32) 優先日      | 平成26年1月7日 (2014.1.7)         |           | 弁理士 酒井 宏明                       |
| (33) 優先権主張国   | 日本国 (JP)                     | (72) 発明者  | 河上 春樹                           |
|               |                              |           | 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大<br>学法人東京大学内 |
|               |                              | (72) 発明者  | 浅見 徹                            |
|               |                              |           | 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大<br>学法人東京大学内 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 送信装置、受信装置、および送受信システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて送信側の入力デジタル信号を復元する復元部を備え、

前記復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする受信装置。

【請求項2】

入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を生成出力する圧縮部と、

前記圧縮デジタル信号を無線送信出力する送信部と、

を有した送信装置と、

前記送信部が無線送信出力した前記圧縮デジタル信号を受信する受信部と、

前記受信部が受信した前記圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する復元部と、

を有した受信装置と、

を備えた送受信システムであって、

前記圧縮部は、前記入力デジタル信号を高速ウォルシュ・アダマール変換し、この変換デジタル信号の中から前記特定周波数成分に対応する部分を抜き出して出力する際、周波

10

20

数順序に並び替えずに抜き出したデジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力し、

前記復元部は、入力された前記圧縮デジタル信号を前記ウォルシュ関数の周波数順序に並び替える並び替え部を有し、前記並び替え部によって並び替えられた前記圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする送受信システム。

【請求項 3】

入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を生成出力する圧縮部と、

前記圧縮デジタル信号を無線送信出力する送信部と、

を有した送信装置と、

前記送信部が無線送信出力した前記圧縮デジタル信号を受信する受信部と、

前記受信部が受信した前記圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する復元部と、

を有した受信装置と、

を備えた送受信システムであって、

前記復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする送受信システム。

【請求項 4】

入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した第 1 圧縮デジタル信号を生成出力する第 1 圧縮部と、

入力デジタル信号を、ランダム行列を用いた観測行列によって変換して圧縮した第 2 圧縮デジタル信号を生成出力する第 2 圧縮部と、

切替指示信号をもとに、前記第 1 圧縮部と前記第 2 圧縮部との処理を切り替える送信側切替部と、

前記送信側切替部が切替出力した前記第 1 圧縮デジタル信号または前記第 2 圧縮デジタル信号を無線送信出力する送信部と、

を有した送信装置と、

前記送信部が無線送信出力した前記第 1 圧縮デジタル信号または前記第 2 圧縮デジタル信号を受信する受信部と、

前記切替指示信号が前記第 1 圧縮部の処理を指示している場合、前記第 1 圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する第 1 復元部と、

前記切替指示信号が前記第 2 圧縮部の処理を指示している場合、前記第 2 圧縮デジタル信号を前記ランダム行列を用いた観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する第 2 復元部と、

前記切替指示信号をもとに、前記第 1 復元部と前記第 2 復元部との処理を切り替える受信側切替部と、

前記送信側切替部と前記受信側切替部とに前記切替指示信号を送出する切替指示部と、

を有した受信装置と、

を備えたことを特徴とする送受信システム。

【請求項 5】

前記第 1 圧縮部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を変換し、この変換デジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力することを特徴とする請求項 4 に記載の送受信システム。

【請求項 6】

前記第 1 圧縮部は、入力デジタル信号を高速ウォルシュ・アダマール変換し、この変換デジタル信号の中から前記特定周波数成分に対応する部分を抜き出して出力することを特徴とする請求項 4 に記載の送受信システム。

## 【請求項 7】

前記第 1 復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする請求項 4～6 のいずれか一つに記載の送受信システム。

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

この発明は、元の入力デジタル信号のスパース性が低い場合であっても精度良く復元を行うことができる送信装置、受信装置、および送受信システムに関する。

## 【背景技術】

10

## 【0002】

低消費電力を要求される無線センサノードでは、消費電力の多くを占める無線送信電力を削減することが不可欠である。その手法の一つに、送信データをデータ圧縮してデータ量を減らすことにより無線送信電力を削減するものがある。

## 【0003】

一般のデータ圧縮では、ZIP や LZH などの圧縮技術が良く使われる。これらの圧縮技術によるデータ圧縮では、多大な演算が必要であり、低消費電力を要求される無線センサノード上で実施するには適さない。例えば、これらのデータ圧縮を無線センサノードに適用すると、無線送信電力の削減量に比して圧縮演算で消費される電力が上回り、却って全体の消費電力が増えてしまうことがあるからである。

20

## 【0004】

一方、低消費電力でデータ圧縮ができる技術には、圧縮センシングがある。圧縮センシングに関しては、例えば、非特許文献 1 に詳しく記載されている。この圧縮センシングの概要は、自然界の多くの信号が持っていると言われる信号のスパース性を利用して、極めて少数に圧縮されたデータから元信号を精度良く復元する技術である。圧縮センシングは、圧縮演算が行列積のみで行われるので演算が容易であり、特に非特許文献 1 では演算に用いる行列として要素に  $\pm 1$  がランダムに並んだランダム観測行列を用いることにより、加減算のみで圧縮演算を実現している。

## 【0005】

具体的に、元のデータの個数を  $N$  とし、圧縮演算の結果、圧縮されたデータの個数を  $M$  とすると、当然  $N > M$  となる。元のデータを  $N$  次元のベクトルである入力デジタル信号  $x$ 、圧縮後のデータを  $M$  次元のベクトルである圧縮デジタル信号  $d$  で表すと、圧縮センシングにおける圧縮演算は、次式 (1) に示すように、 $M$  行  $N$  列の観測行列  $\Phi$  を入力デジタル信号  $x$  に乗算することで圧縮デジタル信号  $d$  を求めることができる。

30

$$d = \Phi x \quad \cdots (1)$$

## 【0006】

ここで、元の入力デジタル信号  $x$  はスパース性を持つ必要がある。入力デジタル信号  $x$  がスパース性を持つとき、入力デジタル信号  $x$  は適切な  $N$  行  $N$  列の基底変換行列  $\Psi$  を用いて次式 (2) のように表される。

$$x = \Psi s \quad \cdots (2)$$

40

## 【0007】

ここで、 $s$  は  $N$  次元のベクトルで、入力デジタル信号  $x$  がスパース性を持つとき、 $s$  は、そのベクトル成分の大部分が 0 になる。

## 【0008】

入力デジタル信号  $x$  が、上述したスパース性を持つとき、観測行列  $\Phi$  として要素がランダムな行列を用いると、観測行列  $\Phi$ 、基底変換行列  $\Psi$ 、および圧縮デジタル信号  $d$  をもとに  $L_1$  ノルム最小化法等を用いて、元の入力デジタル信号  $x$  を精度良く復元できる。

なお、非特許文献 1 では観測行列  $\Phi$  に  $\pm 1$  がランダムに並んだ行列を用いることにより、加減算のみで圧縮演算を実現している。また、データ圧縮時の演算量は、式 (1) が行列積演算であるので、 $M \times N$  となる。

50

## 【0009】

また、特許文献1には、FFTを使用して、データ圧縮時の演算量を $M \times N$ から、 $N + N \times (\log 2) N$ に削減する技術が開示されている。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0010】

【特許文献1】特開2013-90097号公報

## 【非特許文献】

## 【0011】

【非特許文献1】「循環行列を用いたセンサノード上への圧縮センシングの実装と消費電力の評価」、佐々木達哉著、IPJS SIG Technical Report 2012 10

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0012】

しかしながら、非特許文献1に記載された従来の観測行列でデータ圧縮された圧縮デジタル信号 $d$ に対する復元は、元の入力デジタル信号 $x$ に高いスパース性がある場合は精度良く行うことができるが、元の入力デジタル信号 $x$ のスパース性が低い場合は精度良く行うことができない場合がある。

## 【0013】

この発明は、上記に鑑みてなされたものであって、元の入力デジタル信号のスパース性が低い場合であっても精度良く復元を行うことができる送信装置、受信装置、および送受信システムを提供することを目的とする。 20

## 【課題を解決するための手段】

## 【0014】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、この発明にかかる送信装置は、入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を生成出力する圧縮部を備えたことを特徴とする。

## 【0015】

また、この発明にかかる送信装置は、上記の発明において、前記圧縮部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を変換し、この変換デジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力することを特徴とする。 30

## 【0016】

また、この発明にかかる送信装置は、上記の発明において、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列は、ウォルシュ関数の特定周波数成分に対応する行を抜き出した行列であることを特徴とする。

## 【0017】

また、この発明にかかる送信装置は、上記の発明において、前記圧縮部は、入力デジタル信号を高速ウォルシュ・アダマール変換し、この変換デジタル信号の中から前記特定周波数成分に対応する部分を抜き出して出力することを特徴とする。

## 【0018】

また、この発明にかかる受信装置は、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて送信側の入力デジタル信号を復元する復元部を備えたことを特徴とする。 40

## 【0019】

また、この発明にかかる受信装置は、上記の発明において、前記復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする。

## 【0020】

また、この発明にかかる送受信システムは、入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用 50

いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を生成出力する圧縮部と、前記圧縮デジタル信号を無線送信出力する送信部と、を有した送信装置と、前記送信部が無線送信出力した前記圧縮デジタル信号を受信する受信部と、前記受信部が受信した前記圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する復元部と、を有した受信装置と、を備えたことを特徴とする。

【0021】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記圧縮部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を変換し、この変換デジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力することを特徴とする。

10

【0022】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列は、ウォルシュ関数の特定周波数成分に対応する行を抜き出した行列であることを特徴とする。

【0023】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記圧縮部は、入力デジタル信号を高速ウォルシュ・アダマール変換し、この変換デジタル信号の中から前記特定周波数に対応する部分を抜き出して出力することを特徴とする。

【0024】

20

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記圧縮部は、前記特定周波数成分に対応する部分を抜き出す際、周波数順序に並び替えずに抜き出したデジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力し、前記復元部は、入力された前記圧縮デジタル信号を前記ウォルシュ関数の周波数順序に並び替える並び替え部を有し、前記並び替え部によって並び替えられた前記圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする。

【0025】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする。

30

【0026】

また、この発明にかかる送受信システムは、入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した第1圧縮デジタル信号を生成出力する第1圧縮部と、入力デジタル信号を、ランダム行列を用いた観測行列によって変換して圧縮した第2圧縮デジタル信号を生成出力する第2圧縮部と、切替指示信号をもとに、前記第1圧縮部と前記第2圧縮部との処理を切り替える送信側切替部と、前記送信側切替部が切替出力した前記第1圧縮デジタル信号または前記第2圧縮デジタル信号を無線送信出力する送信部と、を有した送信装置と、前記送信部が無線送信出力した前記第1圧縮デジタル信号または前記第2圧縮デジタル信号を受信する受信部と、前記切替指示信号が前記第1圧縮部の処理を指示している場合、前記第1圧縮デジタル信号を前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する第1復元部と、前記切替指示信号が前記第2圧縮部の処理を指示している場合、前記第2圧縮デジタル信号を前記ランダム行列を用いた観測行列を用いて前記入力デジタル信号を復元する第2復元部と、前記切替指示信号をもとに、前記第1復元部と前記第2復元部との処理を切り替える受信側切替部と、前記送信側切替部と前記受信側切替部とに前記切替指示信号を送出する切替指示部と、を有した受信装置と、を備えたことを特徴とする。

40

【0027】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記第1圧縮部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列を用いて前記入力デジタル信号を変換し、この変換デジタル信号を前記圧縮デジタル信号として生成出力することを特徴

50

とする。

【0028】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記第1圧縮部は、入力デジタル信号を高速ウォルシュ・アダマール変換し、この変換デジタル信号の中から前記特定周波数成分に対応する部分を抜き出して出力することを特徴とする。

【0029】

また、この発明にかかる送受信システムは、上記の発明において、前記第1復元部は、前記特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を用いて前記入力デジタル信号を復元することを特徴とする。

【発明の効果】

10

【0030】

この発明によれば、圧縮部が、入力デジタル信号を、ウォルシュ関数を用いて変換し、かつ、特定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号を生成出力するようにしているので、元の入力デジタル信号のスパース性が低い場合であっても特定周波数成分に関して精度良く復元を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0031】

【図1】図1は、この発明の実施の形態1である送受信システムの全体構成を示すブロック図である。

【図2】図2は、実施の形態1の送信装置による送信処理手順の概要を示すフローチャートである。

20

【図3】図3は、実施の形態1の受信装置による受信処理手順の概要を示すフローチャートである。

【図4】図4は、この発明の実施の形態1における具体的な信号処理の概要を模式的に示すタイムチャートである。

【図5】図5は、入力デジタル信号をベクトル表現した図である。

【図6】図6は、実施の形態1における圧縮部および復元部による圧縮あるいは復元に使用される抽出観測行列を示す図である。

【図7】図7は、圧縮デジタル信号をベクトル表現した図である。

【図8】図8は、実施の形態1における復元部の復元処理で用いられる基底変換行列を行列表現した図である。

30

【図9】図9は、 $2^n$ 次のアダマール行列 $H(2^n)$ と $2^{n+1}$ 次のアダマール行列 $H(2^{n+1})$ との関係を示す図である。

【図10】図10は、図9に示した関係をもとに、具体的に数値で表した $2^3$ 次までのアダマール行列の生成を示す図である。

【図11】図11は、 $2^3$ 次のアダマール行列と、このアダマール行列に対応するウォルシュ関数との関係を示す図である。

【図12】図12は、ウォルシュ関数に対応する観測行列から、特定周波数成分を抽出する抽出観測行列を生成する状態を模式的に示した図である。

【図13】図13は、ランダム行列を観測行列とした従来の圧縮センシングを適用した場合の圧縮前と復元後の、ある高速道路高架橋の振動のパワースペクトル図である。

40

【図14】図14は、図13と同じ高速道路高架橋の振動の入力デジタル信号を、この実施の形態1によるウォルシュ関数に対応した抽出観測行列を用いて圧縮および復元した場合のパワースペクトル図を表している。上段の図(図14(a))は、圧縮前の元の入力デジタル信号のパワースペクトル、中段の図(図14(b))は、後述するが、逆ウォルシュ変換によって復元した場合のパワースペクトル、下段の図(図14(c))は、後述する離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列 $\Psi$ を用いて復元した場合のパワースペクトルである。

【図15】図15は、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列を示す図である。

【図16】図16は、この発明の実施の形態2である送受信システムの圧縮部の構成を示

50

すブロック図である。

【図 17】図 17 は、この発明の実施の形態 2 である送受信システムの復元部の構成を示すブロック図である。

【図 18】図 18 は、高速ウォルシュ・アダマール変換アルゴリズムのシグナルフローを示す図である。

【図 19】図 19 は、高速ウォルシュ・アダマール変換の具体例を示す図である。

【図 20】図 20 は、特定周波数成分抽出部による抽出処理を模式的に説明する説明図である。

【図 21】図 21 は、抽出したい特定周波数を指定する抽出データの一例を示す図である。

10

【図 22】図 22 は、並び替え部が保持する並び替えデータの一例を示す図である。

【図 23】図 23 は、実施の形態 2 における送信装置の送信処理手順を示すフローチャートである。

【図 24】図 24 は、実施の形態 2 における受信装置の受信処理手順を示すフローチャートである。

【図 25】図 25 は、この発明の実施の形態 3 である送受信システムの概要構成を示すブロック図である。

【図 26】図 26 は、実施の形態 3 における圧縮部の詳細構成を示すブロック図である。

【図 27】図 27 は、実施の形態 3 における復元部の詳細構成を示すブロック図である。

【図 28】図 28 は、実施の形態 3 における送信装置の送信処理手順を示すフローチャートである。

20

【図 29】図 29 は、実施の形態 3 における受信装置の受信処理手順を示すフローチャートである。

【図 30】図 30 は、実施の形態 3 の変形例における圧縮部の詳細構成を示すブロック図である。

【図 31】図 31 は、実施の形態 3 の変形例における復元部の詳細構成を示すブロック図である。

【発明を実施するための形態】

【0032】

以下、添付図面を参照してこの発明を実施するための形態について説明する。

30

【0033】

(実施の形態 1)

図 1 は、この発明の実施の形態 1 である送受信システムの全体構成を示すブロック図である。この送受信システムでは、例えば、図示しない加速度センサが構造物の振動の加速度成分を計測し、図示しないアナログ・デジタル変換器によってデジタル信号に変換された入力デジタル信号  $x$  がそれぞれ対応する複数の送信装置 1 に入力される。各送信装置 1 は、入力デジタル信号  $x$  を圧縮部 11 によって圧縮した圧縮デジタル信号  $d$  を生成し、送信部 13 がこの圧縮デジタル信号  $d$  を 1 つの受信装置 2 側に送信する。受信装置 2 では、受信部 21 が各送信装置 1 から送信された圧縮デジタル信号  $d$  を受信し、復元部 22 がこの圧縮デジタル信号  $d$  を復元し、復元デジタル信号  $x'$  として出力する。なお、受信装置 2 は、各送信装置 1 から送信された複数の圧縮デジタル信号  $d$  を受信して復元するが、ここでは、1 つの送信装置 1 から送信された圧縮デジタル信号  $d$  の受信と復元とについて説明する。

40

【0034】

図 2 は、送信装置 1 による送信処理手順の概要を示すフローチャートである。また、図 3 は、受信装置 2 による受信処理手順の概要を示すフローチャートである。図 2 に示すように、まず、送信装置 1 には入力デジタル信号  $x$  が入力される。この入力デジタル信号は、圧縮センシングフレームごとに分割され、1 つの圧縮センシングフレームが 1 つの入力デジタル信号  $x$  である。そして、入力デジタル信号  $x$  は、 $N$  個のデータ列からなる。圧縮部 11 は、入力デジタル信号  $x$  を、ウォルシュ (Walsh) 関数を用いて変換し、かつ、特

50

定周波数成分を抽出して圧縮した圧縮デジタル信号  $d$  を生成出力する（ステップ  $S101$ ）。なお、この特定周波数成分の抽出とは、特定周波数成分を選択的に抜き出すことをいう。この特定周波数成分とは、例えば、構造物の固有振動数のモニタリング等における固有振動数を含む特定の周波数領域の信号成分である。この実施の形態 1 では、圧縮部 11 は、特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列  $\Phi a$ （以下、抽出観測行列  $\Phi a$  という）を用いて入力デジタル信号  $x$  を変換し、この変換デジタル信号を圧縮デジタル信号  $d$  として生成出力する。圧縮デジタル信号  $d$  は、 $M$  ( $M < N$ ) 個のデータ列に圧縮される。その後、送信部 13 は、生成された圧縮デジタル信号  $d$  を無線送信する（ステップ  $S102$ ）。ここで、 $M < N$  の関係を有するため、送信装置 1 は、 $N$  個のデータを無線送信する場合よりも少ない  $M$  個のデータを無線送信するため、無線送信の消費電力を削減することができる。

10

#### 【0035】

一方、図 3 に示すように、受信装置 2 では、受信部 21 が送信装置 1 から送信された圧縮デジタル信号  $d$  を受信する（ステップ  $S201$ ）。その後、復元部 22 は、受信された圧縮デジタル信号  $d$  を、抽出観測行列  $\Phi a$  および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列  $\Psi$  を用いて、例えば  $L1$  ノルム最小化法等を利用して復元処理を実行し、復元デジタル信号  $x'$  を生成出力する（ステップ  $S202$ ）。

#### 【0036】

復元デジタル信号  $x'$  は、元の入力デジタル信号  $x$  と同じ  $N$  個のデータとして復元されるが、後述するように復元誤差を持っている。この復元誤差は、従来の圧縮センシングを使用した場合、入力デジタル信号  $x$  のスパース性に依存し、スパース性が高いと復元誤差が小さくなり、スパース性が低いと復元誤差が大きくなる。

20

#### 【0037】

なお、一般に上述した圧縮センシングを使用すると、ZIP や LZH といった従来の圧縮技術に対して、復元誤差が発生するが、ZIP や LZH などの従来の圧縮技術に比較して、圧縮処理が行列積演算のみで実行されるため圧縮演算の消費電力が極めて小さくなる。一方、圧縮センシングでは、復元処理が複雑になり復元側の消費電力が一般に増加する。ここで、一般に無線センシングシステムなどの送受信システムの場合、圧縮処理を行う無線センサノードである送信装置 1 側はバッテリー駆動等で消費電力を抑える必要があるが、復元処理を行う受信装置 2 側は電力を十分に供給できる構成になっているので、送信装置 1 の消費電力を抑制する圧縮センシング技術は無線センシングシステムに適していると言える。

30

#### 【0038】

図 4 は、この発明の実施の形態 1 における具体的な信号処理の概要を模式的に示すタイムチャートである。図 4 に示すように、入力デジタル信号  $x$  は、例えば  $N = 256$  個の圧縮センシングフレームに分割される。その後、圧縮部 11 によって各圧縮センシングフレーム毎に各入力デジタル信号  $x$  の圧縮処理が行われ、 $M = 80$  の圧縮デジタル信号  $d$  に変換される。その後、受信装置 2 側の復元部 22 によって、復元処理が施され、圧縮前と同数である  $N$  個の復元デジタル信号  $x'$  が生成される。ここで、上述したように、 $M < N$  であるので、送信装置 1 側の無線送信電力が削減される。

40

#### 【0039】

図 5 は、入力デジタル信号  $x$  をベクトル表現したものである。ここでは、要素数  $N$  個の列ベクトルとして表現される。図 6 は、圧縮部 11 および復元部 22 による圧縮あるいは復元に使用される抽出観測行列  $\Phi a$  を示している。図 6 では、抽出観測行列  $\Phi a$  が  $M$  行  $N$  列の行列として表されている。図 7 は、圧縮デジタル信号  $d$  をベクトル表現したものである。ここでは、圧縮デジタル信号  $d$  は、要素数  $M$  個の列ベクトルとして表されており、 $M < N$  の関係となる。この実施の形態 1 による圧縮センシングにおけるデータ圧縮は、式 (3) で表される行列演算により実施される。このため、ZIP や LZH といった従来の圧縮技術と比較して簡単な演算で実行でき、演算数は  $M \times N$  回となる。

$$d = \Phi a x \quad \dots (3)$$

50

## 【0040】

図8は、復元部22の復元処理で用いられる基底変換行列 $\Psi$ の行列表現を表している。ここでは、基底変換行列 $\Psi$ がN行N列の行列で表現され、後述するように、復元部22は、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列 $\Psi$ を用いている。

## 【0041】

ここで、図1に示すように、圧縮部11は、抽出観測行列乗算部12を有している。抽出観測行列乗算部12は、式(3)に示すように、N個のデータ列である入力デジタル信号 $x$ に対し、抽出観測行列 $\Phi a$ を乗算(行列積演算)し、M個のデータ列である圧縮デジタル信号 $d$ を生成する。したがって、抽出観測行列乗算部12の演算量は、 $M \times N$ となる。

10

## 【0042】

ところで、従来の圧縮センシングにおける観測行列 $\Phi$ は、非特許文献1に記載されるように、各要素がランダムなランダム行列を用いるが、この実施の形態1では、特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する抽出観測行列 $\Phi a$ を用いて入力デジタル信号 $x$ を変換して圧縮している。

## 【0043】

つぎに、図9～図12を参照して、ウォルシュ関数から抽出観測行列 $\Phi a$ を生成する手順について説明する。まず、ウォルシュ関数は閉区間 $[0, 1]$ が $2^n$ 個に等分割され、各区間の値が+1または-1である方形波状の関数である。ウォルシュ関数は、三角関数と似た性質をもつ完備な正規直交関数系であり、フーリエ級数展開と同様に周期をもつ任意波形をウォルシュ級数展開できる。ここで、ウォルシュ関数は、アダマール(Hadamard)行列を並び替えることで得られる。アダマール行列とは、 $\pm 1$ の2値からなる大きさ $2^n \times 2^n$ の正方向行列であり、 $2^n$ 次のアダマール行列 $H(2^n)$ が与えられたとき、 $2^{n+1}$ 次のアダマール行列 $H(2^{n+1})$ は、図9に示すように表される。図10は、図9に示す関係をもとに、具体的に数値で表した $2^3$ 次までのアダマール行列の生成を示している。この実施の形態1では、 $N = 256$ なので、図示はしないが、 $2^8 = 256$ より、 $2^8$ 次のアダマール行列を適用している。

20

## 【0044】

ここで、アダマール行列 $H(2^n)$ の各行の系列をその交差数順に並べ替えることでウォルシュ関数が得られる。交差数とは各行の系列において値が+1から-1、または-1から+1に変化する回数である。ウォルシュ関数は、交差数の昇順に概ねフーリエ級数のsin波とcos波とに対応する行が現れ、対応する周波数が上がる。ここで、最初の行は直流に対応する。図11では、 $2^3$ 次のアダマール行列と、このアダマール行列に対応するウォルシュ関数(波形 $wal(k, t/T)$ :  $k$ は交差数)とを示している。なお、この実施の形態1では、図示しない $2^8$ 次のウォルシュ関数を用いている。

30

## 【0045】

図12は、ウォルシュ関数に対応する観測行列 $\Phi$ から、特定周波数成分を抽出する抽出観測行列 $\Phi a$ を生成する方法を模式的に示す図である。特定周波数成分は、例えば、構造物のヘルスマモニタリングの場合、構造物の固有振動数付近に設定する。この実施の形態1では、構造物の固有振動数が4Hz付近にあるので、特定周波数成分を2～5Hzに設定している。

40

## 【0046】

ウォルシュ関数から特定周波数成分を抽出する方法は、特定周波数成分に対応する行を選択的に抜き出すことである。例えば、この実施の形態1におけるアナログ/デジタル変換のサンプリング周波数 $f_s$ を20Hzとすると、ウォルシュ関数では、一行目が0Hzに対応し、最後の行、すなわちN行目は、 $(N/2) / (N/f_s) = f_s/2$  Hzに対応している。したがって、この実施の形態1では、 $20/2 = 10$  Hzに対応している。そして、2行毎に各行に含まれる周期が一つずつ増えていくので、 $2i$ 及び $2i+1$ 行目は、 $i / (N/f_s)$  Hzに対応している。この実施の形態1では、 $N = 256$ なので、 $i/12.8$  Hzとなる。したがって、2Hzに対応するのは、 $i/12.8 = 2$

50

を解いて、 $i = 25.6$ 、 $2i = 51.2$ となるが、50行目と51行目とが同一周波数を表すので、50行目からとなる。また、5Hzに対応する行は、 $i / 12.8 = 5$ を解いて、 $i = 64$ 、 $2i + 1 = 129$ となり、129行目までとなる。したがって、2～5Hzに対応する行は、50～129行の80行となり、この80行をウォルシュ関数に対応する観測行列 $\Phi$ から抽出して抽出観測行列 $\Phi a$ が求まる。

#### 【0047】

図12では、観測行列 $\Phi$ の開始行がウォルシュ関数の $k$ 行目とし、観測行列 $\Phi$ の行数を $M$ で表している。したがって、この実施の形態1の抽出観測行列 $\Phi a$ では、 $k = 50$ 、 $M = 80$ となる。圧縮部11による圧縮後のデータ数は $M = 80$ 個となるので、圧縮率は $80 / 256 = 31 (\%)$ となり、元の入力デジタル信号 $x$ を $1/3$ 以下に圧縮している。

10

#### 【0048】

図13は、ランダム行列を観測行列とした従来の圧縮センシングを適用した場合の圧縮前と復元後の、ある高速道路高架橋の振動（加速度）のパワースペクトルを表している。すなわち、図13の横軸は周波数であり、縦軸はPSD（Power Spectral Density：パワースペクトル密度）である。ここで、アナログ／デジタル変換のサンプリング周波数は20Hzであり、図中の上（図13（a））が圧縮前の元データのパワースペクトル、下（図13（b））が復元後のパワースペクトルを表している。この例は、元の入力デジタル信号 $x$ のスパース性が低い場合の例となり、例えば高架橋の固有振動数が4Hzの両サイドに、比較的大きなピークが一つずつある。復元後のパワースペクトルを見ると、復元する必要のある固有振動数4Hzのピークが小さくなり、両サイドのピークが強調されているのが判る。このように、従来の圧縮センシングでは、入力デジタル信号 $x$ のスパース性が低いときに復元誤差が大きくなる。

20

#### 【0049】

これに対し、図14は、同じ高速道路高架橋の振動（加速度）の入力デジタル信号 $x$ を、この実施の形態1によるウォルシュ関数に対応した抽出観測行列 $\Phi a$ を用いて圧縮および復元した場合のパワースペクトルを表している。ここで、アナログ／デジタル変換のサンプリング周波数は20Hzであり、上段の図（図14（a））は、圧縮前の元の入力デジタル信号 $x$ のパワースペクトル、中段の図（図14（b））は、後述するが、逆ウォルシュ変換によって復元した場合のパワースペクトル、下段の図（図14（c））は、後述する離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列 $\Psi$ を用いて復元した場合のパワースペクトルである。図14（a）と図14（c）とを比較すると、元の入力デジタル信号 $x$ には、大きいピークが3つあり、やはりスパース性が低い場合となるが、圧縮前の元の入力デジタル信号 $x$ が示すデータで一番大きかった固有振動数4Hzのピークは、図13とは異なり、復元後でも一番大きいピーク状態で復元されており、抽出観測行列 $\Phi a$ を用いた圧縮を行うと、復元精度が高くなることが判る。

30

#### 【0050】

すなわち、非特許文献1に記載されたランダム行列を観測行列とする従来の圧縮センシングを適用して圧縮および復元した場合に比して、この実施の形態1によるウォルシュ関数を利用した抽出観測行列 $\Phi a$ による圧縮および復元では、スパース性が低い場合にも適用可能で、復元精度を高くすることができる。特に、この実施の形態1では、スパース性が高い場合に限定される従来の圧縮センシング技術よりも適用できる範囲が広がることが判る。すなわち、構造物のヘルスマonitoringのように固有振動数付近の特定周波数範囲を精度良く復元する必要がある用途には、この実施の形態1を適用する方が好ましい。

40

#### 【0051】

また、この実施の形態1では、ウォルシュ関数に対応する抽出観測行列 $\Phi a$ が $\pm 1$ の要素から生成されているので、式（3）の行列積の演算が、加減算の実行のみで実現される。したがって、特許文献1で用いられている高速フーリエ変換（FFT）を用いる場合のように積和演算をする必要がないため、送信装置1側の演算消費電力を大幅に削減できる。

#### 【0052】

50

ところで、この実施の形態 1 では、ウォルシュ関数に対応する抽出観測行列  $\Phi a$  によって圧縮をしているので、復元時に、抽出観測行列  $\Phi a$  を用いた逆ウォルシュ変換を用いることが考えられる。しかしながら、発明者の検討によると、図 14 (b) に示すように、逆ウォルシュ変換を用いて復元すると特定周波数領域の境界である 2 Hz、5 Hz で復元波形の折り返しが発生することが判った。具体的に、図 14 (b) では、5 Hz を境に 4 ~ 5 Hz にある 3 つの大きなピークが、5 ~ 6 Hz に折り返して生成されてしまっていることが判る。また、縦軸を見ると、各ピークのパワースペクトル密度が、図 14 (a) に対して小さくなっていることが判る。具体的に、一番大きい 4 Hz のピークのパワースペクトル密度に関して、図 14 (a) では 3.8 くらいの値であったものが、図 14 (b) では、1.4 程度に小さくなってしまっている。これは、波形が折り返して別の周波数の部分にも復元されるため、エネルギーが分散してしまうことが原因と考えられる。このため、縦軸のパワースペクトル密度の再現性が悪い。

10

#### 【0053】

これに対し、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列  $\Psi$  を用いて復元した場合、図 14 (c) に示すように、折り返しは発生せず、縦軸のパワースペクトル密度も 3.9 くらいであり、ほぼ元のデータに復元されている。したがって、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列  $\Psi$  を使用して復元処理を実施したほうが、より高い精度で復元できる。

#### 【0054】

図 15 は、この基底変換行列  $\Psi$  を示している。ここで、基底変換行列  $\Psi$  は、つぎのように求められる。まず、式 (2) のベクトル  $x$  とベクトル  $s$  とを用いて、離散逆フーリエ変換を次式 (4) のように表すことができる。

20

#### 【数 1】

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{\frac{2\pi j}{N} n i} \quad \dots (4)$$

ここで、 $x_i$  と  $s_n$  とは、それぞれベクトル  $x$  の  $i$  番目の要素と、ベクトル  $s$  の  $n$  番目の要素である。したがって、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列  $\Psi$  は、図 15 に示すようになる。

#### 【0055】

(実施の形態 2)

30

つぎに、この発明の実施の形態 2 について説明する。上述した実施の形態 1 では、圧縮部 11 が、入力デジタル信号  $x$  に抽出観測行列  $\Phi a$  を乗算することによって圧縮を行っていたが、この実施の形態 2 の圧縮部 11 は、まず高速ウォルシュ・アダマール変換を行い、この変換されたデジタル信号の中から特定周波数部分に対応する部分を抜き出したものを圧縮デジタル信号  $d$  として無線送信するようにしている。

#### 【0056】

図 16 は、この発明の実施の形態 2 である送受信システムの圧縮部 11 の構成を示すブロック図である。この圧縮部 11 は、高速ウォルシュ・アダマール (Fast Walsh-Hadamard) 変換演算部 31 と特定周波数成分抽出部 32 とを有する。

#### 【0057】

40

高速ウォルシュ・アダマール変換演算部 31 は、入力デジタル信号  $x$  に対して高速ウォルシュ・アダマール変換を行う。高速ウォルシュ・アダマール変換は、ウォルシュ関数の演算処理を少ない演算数で実行する処理である。この高速ウォルシュ・アダマール変換は、高速フーリエ変換 (FFT) と同じバタフライ演算を行う。したがって、この実施の形態 2 では、その後、特定周波数成分抽出部 32 が高速ウォルシュ・アダマール変換後の変換デジタル信号の中から特定周波数成分に対応する部分を抜き出すことによって、少ない演算数で、実施の形態 1 で説明したウォルシュ関数に対応した抽出観測行列  $\Phi a$  で圧縮する場合と全く同一の結果が得られる。

#### 【0058】

図 17 は、この発明の実施の形態 2 である送受信システムの復元部 22 の構成を示すブ

50

ロック図である。圧縮部 1 1 の特定周波数成分抽出部 3 2 では、抽出した特定周波数成分の周波数順序を並び替えず、そのまま出力する。このため、実施の形態 2 の復元部 2 2 では、実施の形態 1 の復元部 2 2 と同じ機能を有する復元演算部 4 2 の前段に並び替え部 4 1 を設ける。そして、並び替え部 4 1 は、入力された圧縮デジタル信号 d をウォルシュ関数の周波数順に並び替え、復元演算部 4 2 に、並び替えた圧縮デジタル信号 d を出力する。

#### 【0059】

図 1 8 は、高速ウォルシュ・アダマール変換アルゴリズムのシグナルフローを示している。図 1 8 では、一例として、 $2^3$  次の場合における高速ウォルシュ・アダマール変換アルゴリズムを示しており、入力デジタル信号 x のデータ数  $N = 8$  である。図上、一番左の列がこの入力デジタル信号 x ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ ) を表している。まず、第一段階として、一番左の列のデータを 2 分割して 2 つのグループ ( $X_1, X_2, X_3, X_4$ ), ( $X_5, X_6, X_7, X_8$ ) に分ける。そして各々のグループの先頭のデータ同士  $X_1, X_5$ 、2 番目のデータ同士  $X_2, X_6$ 、3 番目のデータ同士  $X_3, X_7$ 、4 番目のデータ同士  $X_4, X_8$  の加減算を行っていき、2 番目の列のデータを作成する。次に、2 番目の列のデータを更に 2 分割して 2 つずつのデータに 4 分割する。そして、1 番目のグループの先頭データと 2 番目のグループの先頭データ同士といった順番に加減算を行い、3 列目のデータを作成する。最後に、3 列目のデータを更に 2 分割して一つ一つ独立した 8 個のデータとし、先頭データと 2 番目データ同士、3 番目データと 4 番目データ同士といった順番で加減算を行っていき、出力データとなる 4 列目のデータを作成する。すなわち、入力デジタル信号 x ( $X_1 \sim X_8$ ) に対して高速ウォルシュ・アダマール変換のバタフライ演算を行って、変換デジタル信号 t ( $T_1 \sim T_8$ ) を出力する。

#### 【0060】

この場合の高速ウォルシュ・アダマール変換の演算数は、各段階で  $N = 8$  回ずつ、段階数は  $(\log 2) 8 = 3$  となる。したがって、この実施の形態 2 では、実施の形態 1 に比べて、演算数を削減できる。具体的には、実施の形態 1 では、式 (3) の行列積を演算するため、演算数は  $N \times M$  となり、この実施の形態 2 では、 $N \times (\log 2) N$  となる。なお、この実施の形態 1 では、 $N = 256$ 、 $M = 80$  の例を説明しているが、この場合の演算数は、 $256 \times 80 = 20,480$  回であるのに対し、実施の形態 2 では、 $256 \times (\log 2) 256 = 256 \times 8 = 2,048$  となり、 $1/10$  に削減できることが判る。

#### 【0061】

さらに、図 1 9 は、高速ウォルシュ・アダマール変換の具体例を示している。図 1 8 に示した入力デジタル信号 x は、データ数  $N = 8$  であり、各要素が順番に 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0 である。図 1 9 では、具体的に 3 段階の加減算を行うバタフライ演算の経過が図示されており、最終的な出力として、4, 2, 0, -2, 0, 2, 0, 2 が得られることが判る。

#### 【0062】

図 1 8 および図 1 9 に示したように、高速ウォルシュ・アダマール変換後の変換デジタル信号 t の出力個数は  $N = 8$  のままであり、入力デジタル信号 x の個数と同じである。そこで、特定周波数成分抽出部 3 2 は、高速ウォルシュ・アダマール変換の演算結果から、特定の周波数領域に対応する部分のみを抽出し、データ圧縮を実現する。

#### 【0063】

図 2 0 は、特定周波数成分抽出部 3 2 による抽出処理を模式的に説明する説明図である。図 2 0 では、 $2^3$  次の場合を一例として示している。図中の右 (図 2 0 (b)) の行列は、高速ウォルシュ・アダマール変換と等価なアダマール行列を示している。一方、図中の左 (図 2 0 (a)) の行列は、対応するウォルシュ関数を示している。また、図 2 0 (a) と図 2 0 (b) との間の矢印は各行の対応関係を示している。

#### 【0064】

ここで、図 2 0 (a) の四角で囲まれた 2 ~ 5 行目が、抽出したい特定周波数領域に対

10

20

30

40

50

応する行である。この各行に対応する図20(b)の行列の行は、3, 4, 5, 7番目になることが判る。図21は、この抽出したい特定周波数を指定する抽出データの一例を示している。図21に示す抽出データでは、3, 4, 5, 7番目の要素を「1」として抽出したい要素の順番を示し、その他の要素は「0」として抽出しない要素の順番を示している。特定周波数成分抽出部32は、図20に示した抽出データをあらかじめ保持することにより、例えば固有振動数を含んだ特定周波数領域のみを抽出する。この特定周波数成分抽出部32による特定周波数成分の抽出を行うことによって、圧縮部11は、入力デジタル信号xを圧縮した圧縮デジタル信号dとして出力することができる。

#### 【0065】

なお、構造物の固有振動数は予め測定して特定することができ、また構造物の損傷等で変化してもその変化量は限られているので、抽出データとして、抽出したい特定周波数領域をあらかじめ保持することが可能であり、かつ特定周波数領域は小さな領域でよく、データを大幅に圧縮することが可能となる。

#### 【0066】

一方、復元部22の並び替え部41は、図21の抽出データによって抽出された圧縮デジタル信号dを本来のウォルシュ関数の順番に並び替える処理を行う。図20に示すように、図20(b)行列が高速ウォルシュ・アダマール変換を実施した状態のアダマール変換行列を示し、その中の破線の○で囲ってある行が抽出される特定周波数領域に当たる行であるが、各々の行が左のウォルシュ関数を表す行列の特定周波数に当たる破線の四角で囲った領域の何番目に対応するかを中央の矢印が示している。これによると、右の行列の破線の○で囲ってある部分の内の一番上が左行列の破線の四角で囲ってある部分の内の3番目、右の2番目が左の4番目、右の3番目が左の1番目、右の4番目が左の2番目に対応することが判る。

#### 【0067】

このため、並び替え部41は、図22に示すような並び替えデータを保持し、この並び替えデータをもとに、圧縮デジタル信号dをウォルシュ関数の周波数順に並び替える。図22に示した並び替えデータは、「3, 4, 1, 2」であり、この値は、入力された圧縮デジタル信号dの一番目が本来のウォルシュ関数の3番目、二番目が4番目、三番目が1番目、四番目が2番目に対応することを示している。この並び替えデータを用いることにより、高速ウォルシュ・アダマール変換を実施した状態のデータを本来のウォルシュ関数の順番に並べ替える処理を実行できる。

#### 【0068】

復元演算部42は、実施の形態1の復元部22と同じ処理を行う。すなわち、復元演算部42は、並び替えられたデータに対し、実施の形態1と同様に、抽出観測行列 $\Phi$ aや基底変換行列 $\Psi$ を利用して、L1ノルム最小化法等により、データを復元し、復元デジタル信号x'を出力することができる。なお、実施の形態1と同様に、離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列 $\Psi$ を用いて復元処理すると、一層、精度の良い復元を行うことが可能となる。

#### 【0069】

ここで、図23および図24に示したフローチャートを参照して、実施の形態2における送信装置1の送信処理手順および受信装置2の受信処理手順について説明する。まず、送信装置1の送信処理手順について説明する。図23に示すように、圧縮部11の高速ウォルシュ・アダマール変換演算部31は、入力デジタル信号xを高速ウォルシュ・アダマール変換する(ステップS301)。その後、特定周波数成分抽出部32は、高速ウォルシュ・アダマール変換された変換デジタル信号tの中から、特定周波数成分を抽出して圧縮デジタル信号dを生成する(ステップS302)。そして、送信部13は、この圧縮デジタル信号dを無線送信して(ステップS303)、本処理を終了する。

#### 【0070】

一方、受信装置2は、図24に示すように、受信部21が圧縮デジタル信号dを受信する(ステップS401)。その後、並び替え部41が、この圧縮デジタル信号dをウォル

10

20

30

40

50

シュ関数の周波数順序に並び替える（ステップS402）。その後、復元演算部42は、特定周波数成分のウォルシュ関数に対応する観測行列である抽出観測行列 $\Phi a$ および離散逆フーリエ変換に対応する基底変換行列 $\Psi$ を用いて復元デジタル信号 $x'$ を生成し（ステップS403）、本処理を終了する。

#### 【0071】

なお、並び替え部41を復元部22側に設けたのは、送信装置1側に実装される圧縮部11の処理をなるべく低減して送信装置1側の低消費電力化を図るためである。ここで、復元部22は、並び替え部41を設けても、無線センシングシステムなどの受信装置2側では、一般的に十分な電力供給を受けることが可能である。もちろん、送信装置1側の圧縮部11に並び替え部41を設けるようにしてもよい。

10

#### 【0072】

また、この実施の形態2では、高速ウォルシュ・アダマール変換を行うようにしているので、圧縮部11の演算に必要なメモリ容量を小さくすることができる。実施の形態1では、M行N列の抽出観測行列 $\Phi a$ をメモリ上に持つ必要があり、その必要メモリ量は約 $M \times N$ となる。一方、実施の形態2では抽出観測行列 $\Phi a$ をメモリ上に持つ必要がないので、おおよその必要メモリ量はデジタル信号 $x$ を格納するN個のメモリと、特定周波数成分を抽出するためのデータN個のメモリとであり、合計 $2 \times N$ のメモリで済む。一般に、 $M \gg 2$ なので、実施の形態1に比して、大幅に必要なメモリ量を減らすことができ、無線センサノードなどの送信装置1側を一層、低消費電力に設計することが可能となる。

#### 【0073】

なお、実施の形態2では、高速ウォルシュ・アダマール変換アルゴリズムを実行すると、入力データを、逐次演算後のデータで置き換えることが可能となるので、演算後データを格納するメモリを別に用意せずに済み、上述したように、おおよそ $2 \times N$ 個のメモリで演算できることになる。

20

#### 【0074】

（実施の形態3）

つぎに、この発明の実施の形態3について説明する。この実施の形態3では、スパース性の低い場合でも精度の良い復元が可能な実施の形態1に示した圧縮処理および復元処理と、スパース性の高い場合に精度の良い復元が可能な従来の圧縮処理および復元処理とを切り替えることができるようにしている。

30

#### 【0075】

図25は、この発明の実施の形態3である送受信システムの概要構成を示すブロック図である。ここで、実施の形態1に示した送受信システムと異なるのは、圧縮部11に対応する圧縮部110が、第1圧縮部111、第2圧縮部112、送信側切替部113を有する。送信側切替部113は、入力デジタル信号 $x$ に対する圧縮処理を、第1圧縮部111による圧縮処理と第2圧縮部112による圧縮処理とに切り替えて処理させる。また、復元部22に対応する復元部120が、第1復元部121、第2復元部122、受信側切替部123を有する。受信側切替部123は、入力された圧縮デジタル信号 $d$ に対する復元処理を、第1復元部121による復元処理と第2復元部122による復元処理とに切り替えて処理させる。

40

#### 【0076】

なお、第1圧縮部111は、実施の形態1の圧縮部11に相当する。また、第1復元部121は、実施の形態1の復元部22に相当する。一方、第2圧縮部112は、ランダム行列を観測行列 $\Phi$ （以下、ランダム観測行列 $\Phi$ という）として用いて入力デジタル信号 $x$ を圧縮処理する。また、第2復元部122は、ランダム観測行列 $\Phi$ を用いて復元処理を行う。

#### 【0077】

また、受信装置2に対応する受信装置102は、切替指示部124を有する。切替指示部124は受信装置102に設けられた送信部125および送信装置101に設けられた受信部115を介して、送信側切替部113に切替指示信号を送出するとともに、受信側

50

切替部 1 2 3 に切替指示信号を送出する。この切替指示信号は、第 1 圧縮部 1 1 1 による圧縮処理の切替指示を示す場合、第 1 復元部 1 2 1 による復元処理の切替指示を行うように対応づけられる。また、切替指示信号は、第 2 圧縮部 1 1 2 による圧縮処理の切替指示を示す場合、第 2 復元部 1 2 2 による復元処理の切替指示を行うように対応づけられる。

#### 【0078】

図 2 6 は、圧縮部 1 1 0 の詳細構成を示すブロック図である。図 2 6 に示すように圧縮部 1 1 0 は、並列配置された第 1 圧縮部 1 1 1 と第 2 圧縮部 1 1 2 との前段および後段にそれぞれスイッチ SW 1 1, SW 1 2 を設けている。スイッチ SW 1 1, SW 1 2 は、送信側切替部 1 1 3 を構成する。スイッチ SW 1 1, SW 1 2 は、受信部 1 1 5 を介して入力される切替指示信号をもとに、同期させて第 1 圧縮部 1 1 1 と第 2 圧縮部 1 1 2 との接

10

#### 【0079】

一方、図 2 7 は、復元部 1 2 0 の詳細構成を示すブロック図である。図 2 7 に示すように復元部 1 2 0 は、並列配置された第 1 復元部 1 2 1 と第 2 復元部 1 2 2 との前段および後段にそれぞれスイッチ SW 2 1, SW 2 2 を設けている。スイッチ SW 2 1, SW 2 2 は、受信側切替部 1 2 3 を構成する。スイッチ SW 2 1, SW 2 2 は、切替指示部 1 2 4 から入力される切替指示信号をもとに、同期させて第 1 復元部 1 2 1 と第 2 復元部 1 2 2 との接続切替を行う。

#### 【0080】

なお、切替指示部 1 2 4 は、操作入力部として機能し、復元デジタル信号  $x'$  の復元状態をもとに、第 1 圧縮部 1 1 1 と第 1 復元部 1 2 1 とによる圧縮復元処理と、第 2 圧縮部 1 1 2 と第 2 復元部 1 2 2 とによる圧縮復元処理との切替指示を行うことができる。

20

#### 【0081】

ここで、図 2 8 および図 2 9 に示したフローチャートを参照して、実施の形態 3 における送信装置 1 の送信処理手順および受信装置 2 の受信処理手順について説明する。まず、送信装置 1 の送信処理手順について説明する。図 2 8 に示すように、送信装置 1 は、第 1 圧縮処理を指示する切替指示信号が入力されたか否かを判断する（ステップ S 5 0 1）。切替指示信号が第 1 圧縮処理を指示する場合（ステップ S 5 0 1, Yes）には、スイッチ SW 1 1, SW 1 2 を第 1 圧縮部 1 1 1 に接続し、第 1 圧縮部 1 1 1 による圧縮処理を行う（ステップ S 5 0 2）。一方、切替指示信号が第 1 圧縮処理を指示していない場合（ステップ S 5 0 1, No）には、スイッチ SW 1 1, SW 1 2 を第 2 圧縮部 1 1 2 に接続し、第 2 圧縮部 1 1 2 による圧縮処理を行う（ステップ S 5 0 3）。その後、送信部 1 3 は、圧縮部 1 1 0 から出力された圧縮デジタル信号  $d$  を無線送信して（ステップ S 5 0 4）、本処理を終了する。なお、上述した処理は、繰り返し処理される。

30

#### 【0082】

一方、受信装置 2 は、図 2 9 に示すように、第 1 圧縮処理を指示する切替指示信号が入力されたか否かを判断する（ステップ S 6 0 1）。切替指示信号が第 1 圧縮処理を指示する場合（ステップ S 6 0 1, Yes）には、スイッチ SW 2 1, SW 2 2 を第 1 復元部 1 2 1 に接続し、第 1 復元部 1 2 1 による復元処理を行う（ステップ S 6 0 2）。一方、切替指示信号が第 1 圧縮処理を指示していない場合（ステップ S 6 0 1, No）には、スイッチ SW 2 1, SW 2 2 を第 2 復元部 1 2 2 に接続し、第 2 復元部 1 2 2 による復元処理を行う（ステップ S 6 0 3）。なお、上述した処理は、繰り返し処理される。

40

#### 【0083】

ここで、実施の形態 1 では、ウォルシュ関数に対応する抽出観察行列  $\Phi_a$  を用いた圧縮復元処理を行い、スパース性が低い入力デジタル信号  $x$  であっても特定周波数成分に限定することによって精度良く復元できる。しかし、実施の形態 1 では、復元される周波数領域が限られてしまうという特徴がある。一方、従来のランダム観測行列  $\Phi$  を用いた圧縮復元処理では、全周波数領域の復元が可能だが、スパース性が高くないと復元誤差が大きくなるという特徴がある。

#### 【0084】

50

この実施の形態 3 では、復元デジタル信号  $x'$  の性状を調べ、入力デジタル信号  $x$  のスパース性が低いと判断できる場合には、ウォルシュ関数に対応する抽出観測行列  $\Phi a$  を用いた第 1 圧縮部 1 1 1 および第 1 復元部 1 2 1 による圧縮復元処理に切り替える。また、入力デジタル信号  $x$  のスパース性が高いと判断できる場合には、ランダム観測行列  $\Phi$  を用いた第 2 圧縮部 1 1 2 および第 2 復元部 1 2 2 による圧縮復元処理に切り替える。この結果、入力デジタル信号  $x$  のスパース性が低い場合であっても固有振動数近傍の振動を精度良く復元でき、入力デジタル信号  $x$  のスパース性が高い場合には広い周波数範囲の信号が復元できる。すなわち、多様な入力デジタル信号  $x$  に対応して精度の良い復元を行えるという汎用性の高い圧縮復元処理を実現できる。

#### 【0085】

10

ここで、加速度センサによる構造物のヘルスマニタリングに適用する場合、地震等のイベントが発生した際、種々のモードの固有振動が誘起される可能性がある。この場合、ランダム観測行列  $\Phi$  を用いた圧縮復元処理に切り替えて広い周波数範囲で構造物の揺れ方を調べるようにし、通常は、ウォルシュ関数に対応した抽出観測行列  $\Phi a$  を用いた圧縮復元処理を行って、固有振動数近傍の周波数領域を詳細にモニタリングするという使い方が可能となる。

#### 【0086】

また、通常は、ウォルシュ関数に対応した抽出観測行列  $\Phi a$  を用いた圧縮復元処理を行って固有振動数近傍の周波数領域を詳細にモニタリングし、固有振動数に大きな変化が見られた場合に、構造物の揺れ方を広い周波数領域で調べるために、ランダム観測行列  $\Phi$  を用いた圧縮復元処理に切り替える、という使い方も考えられる。すなわち、この実施の形態 3 を適用することによって、信号処理システムや信号処理方法の適用範囲を拡大することができる。

20

#### 【0087】

(実施の形態 3 の変形例)

この実施の形態 3 の変形例は、図 30 および図 31 に示すように、実施の形態 3 の第 1 圧縮部 1 1 1 を実施の形態 2 の圧縮部 1 1 に置き換え、実施の形態 3 の第 1 復元部 1 2 1 を実施の形態 2 の復元部 2 2 に置き換えたものである。したがって、第 1 圧縮部 1 1 1 は、高速ウォルシュ・アダマール変換演算部 3 1 に対応した高速ウォルシュ・アダマール変換演算部 1 1 1 a と、特定周波数成分抽出部 3 2 に対応した特定周波数成分抽出部 1 1 1 b とを有する。同様に、第 1 復元部 1 2 1 は、並び替え部 4 1 に対応した並び替え部 1 2 1 a と、復元演算部 4 2 に対応した復元演算部 1 2 1 b とを有する。この実施の形態 3 の変形例によって、実施の形態 3 と同様な作用効果を奏する。

30

#### 【符号の説明】

#### 【0088】

- 1, 1 0 1 送信装置
- 2, 1 0 2 受信装置
- 1 1, 1 1 0 圧縮部
- 1 2 抽出観測行列乗算部
- 1 3, 1 2 5 送信部
- 2 1, 1 1 5 受信部
- 2 2, 1 2 0 復元部
- 3 1, 1 1 1 a 高速ウォルシュ・アダマール変換演算部
- 3 2, 1 1 1 b 特定周波数成分抽出部
- 4 1, 1 2 1 a 並び替え部
- 4 2, 1 2 1 b 復元演算部
- 1 1 1 第 1 圧縮部
- 1 1 2 第 2 圧縮部
- 1 1 3 送信側切替部
- 1 2 1 第 1 復元部

40

50

1 2 2 第2復元部

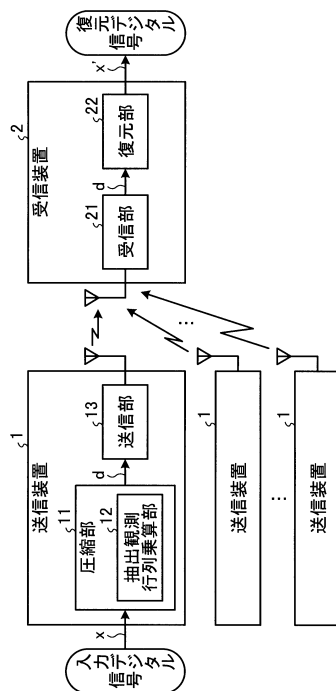
1 2 3 受信側切替部

1 2 4 切替指示部

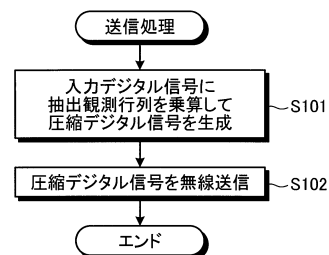
 $f_s$  サンプリング周波数 $SW11$ ,  $SW12$ ,  $SW21$ ,  $SW22$  スイッチ $x$  入力デジタル信号 $t$  変換デジタル信号 $d$  圧縮デジタル信号 $x'$  復元デジタル信号 $\Phi_a$  抽出観測行列 $\Phi$  ランダム観測行列 $\Psi$  基底変換行列

10

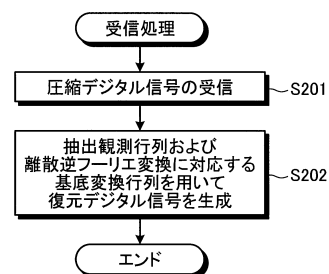
【図1】



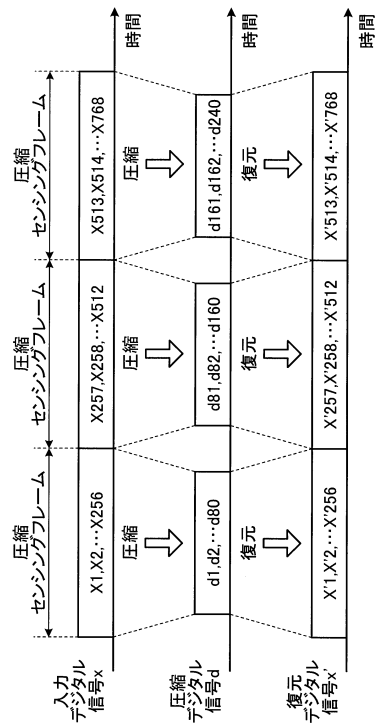
【図2】



【図3】



【図 4】



【図 5】

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_{N-1} \\ X_N \end{bmatrix}$$

【図 6】

$$\Phi_a = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,N-1} & a_{1,N} \\ a_{2,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & a_{2,N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ a_{M,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & a_{M,N} \end{bmatrix}$$

【図 7】

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d_M \end{bmatrix}$$

【図 9】

$$H(2^{n+1}) = \begin{bmatrix} H(2^n) & H(2^n) \\ H(2^n) & -H(2^n) \end{bmatrix}$$

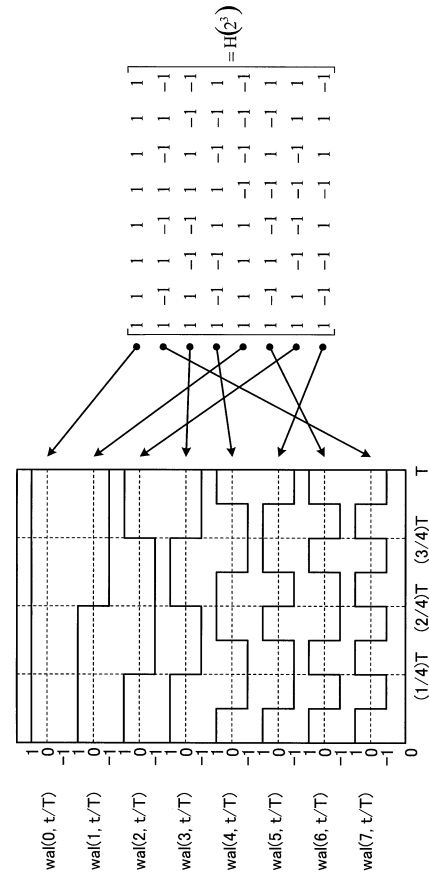
【図 8】

$$\Psi = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & b_{1,3} & \cdots & b_{1,N-1} & b_{1,N} \\ b_{2,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & b_{2,N} \\ b_{3,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & b_{3,N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & \cdot \\ b_{N-1,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & b_{N-1,N} \\ b_{N,1} & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot & b_{N,N} \end{bmatrix}$$

【図 10】

$$\begin{aligned}
 H(2^0) &= [1] \\
 H(2^1) &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\
 H(2^2) &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\
 H(2^3) &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

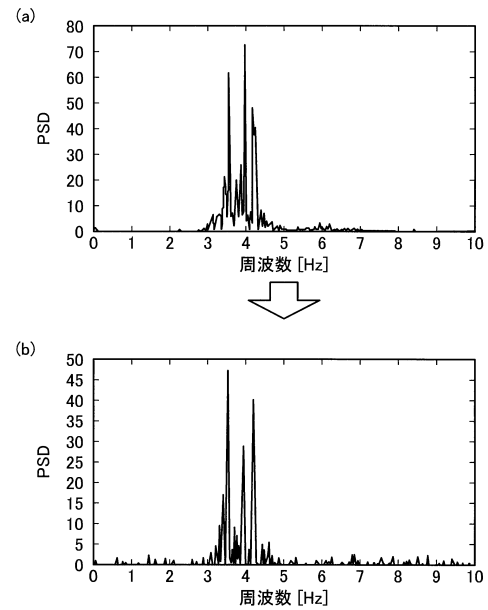
【図 11】



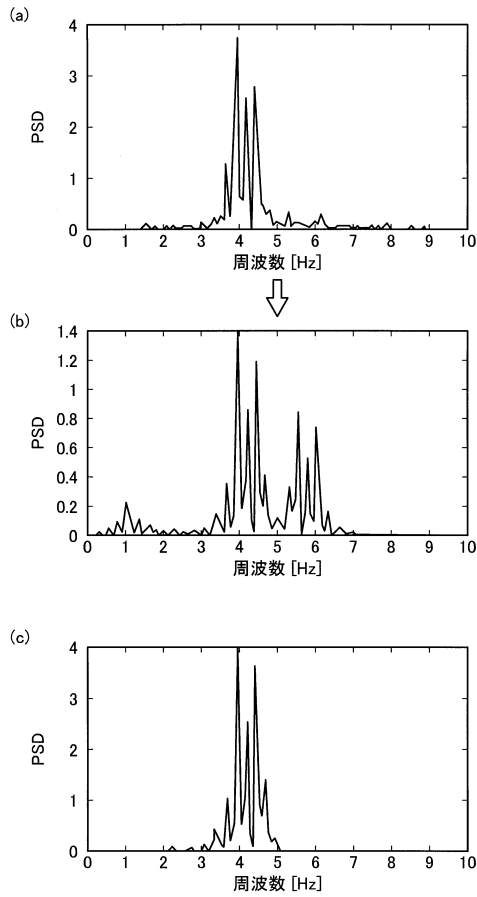
【図 12】

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} W_{k,N} & W_{k+1,N} & \dots & W_{k+M-1,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{k,2} & W_{k+1,2} & \dots & W_{k+M-1,2} \\ W_{k,1} & W_{k+1,1} & \dots & W_{k+M-1,1} \end{bmatrix} \\
 & \quad \quad \quad \uparrow \Phi_a \\
 & \begin{bmatrix} W_{1,N} & W_{2,N} & W_{3,N} & \dots & W_{N-1,N} & W_{N,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ W_{1,3} & W_{2,3} & W_{3,3} & \dots & W_{N-1,3} & W_{N,3} \\ W_{1,2} & W_{2,2} & W_{3,2} & \dots & W_{N-1,2} & W_{N,2} \\ W_{1,1} & W_{2,1} & W_{3,1} & \dots & W_{N-1,1} & W_{N,1} \end{bmatrix} \\
 & \quad \quad \quad \Phi =
 \end{aligned}$$

【図 13】



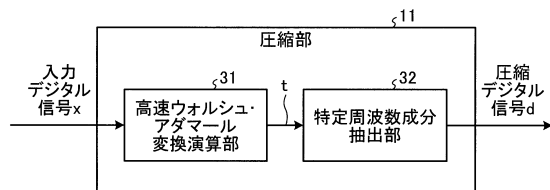
【図 14】



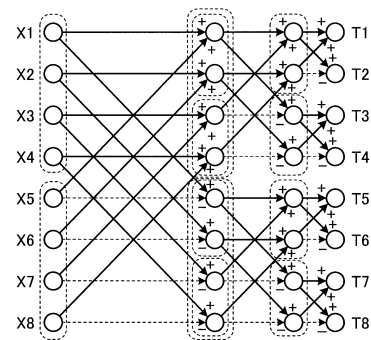
【図 15】

$$\Psi = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}} & \dots & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-3)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)} \\ 1 & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}} & \frac{1}{N} e^{j\frac{8\pi}{N}} & \dots & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-3)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-2)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-3)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-3)} & \dots & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-3)^2} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)(N-3)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)(N-3)} \\ 1 & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-2)} & \dots & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-3)(N-2)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)^2} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)(N-2)} \\ 1 & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{4\pi}{N}(N-1)} & \dots & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-3)(N-1)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)(N-1)} & \frac{1}{N} e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)^2} \end{bmatrix}$$

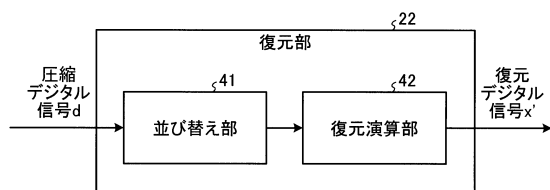
【図 16】



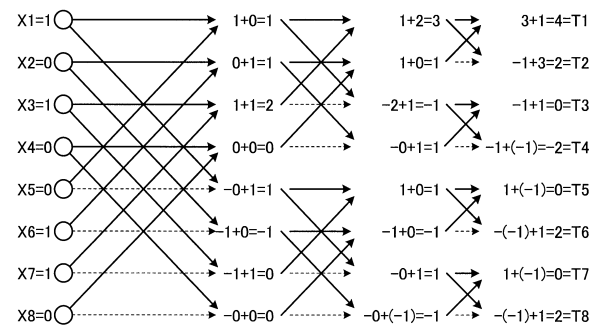
【図 18】



【図 17】

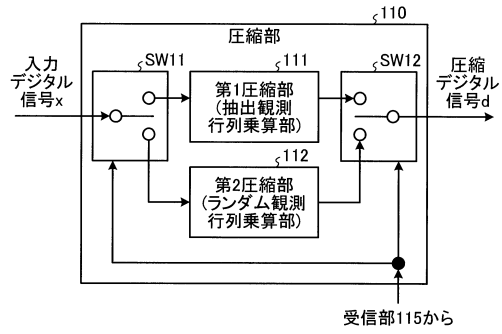


【図 19】

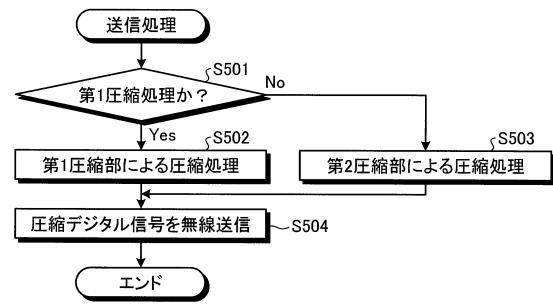




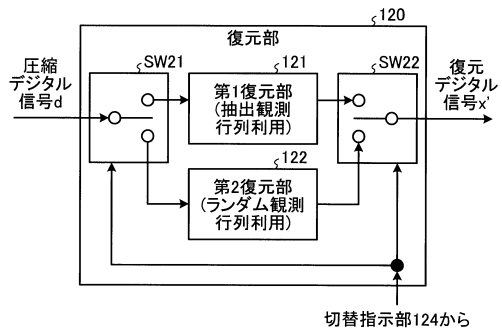
【図 26】



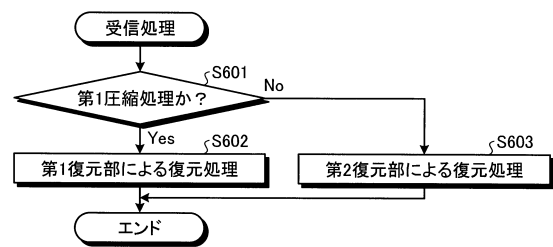
【図 28】



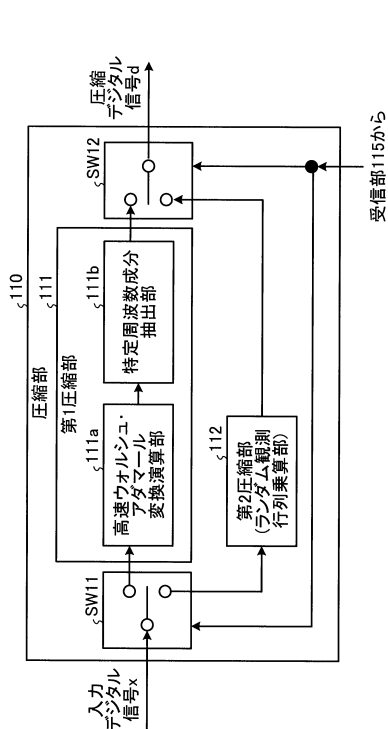
【図 27】



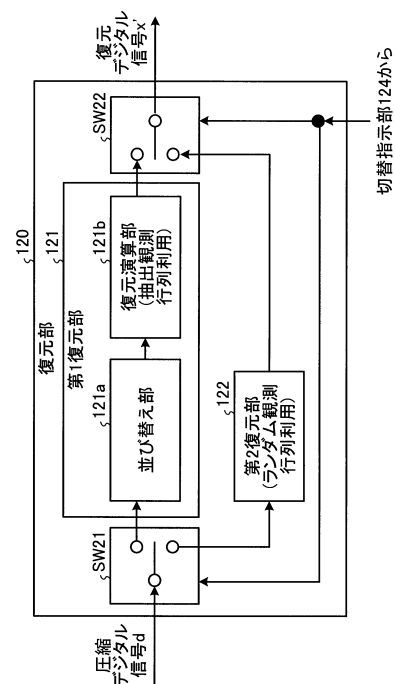
【図 29】



【図 30】



【図 31】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 川原 圭博  
東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大学法人東京大学内
- (72)発明者 木代 雅巳  
神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内
- (72)発明者 工藤 高裕  
神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社内

審査官 北村 智彦

- (56)参考文献 特開2011-193431 (JP, A)  
特開昭57-000700 (JP, A)  
特表2012-507906 (JP, A)  
Cai Zhuoran, Zhao Honglin, Jia Min, Wang Gang, Shen Jingshi, An Improved Hadamard Measurement Matrix Based on Walsh Code For Compressive Sensing, Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 2013 9th International Conference on, 2013年12月, pp.1-4  
河上 春樹, 川原 圭博, 木代 雅巳, 工藤 高裕, 浅見 徹, 橋梁モニタリングセンサを省電力化する選択的圧縮センシング, 電子情報通信学会技術研究報告, 日本, 一般社団法人電子情報通信学会, 2014年 1月16日, vol.113,no.399, pp.231-236

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H03M 3/00-11/00  
IEEE Explore  
Cinii