

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5785903号
(P5785903)

(45) 発行日 平成27年9月30日(2015.9.30)

(24) 登録日 平成27年7月31日(2015.7.31)

(51) Int. Cl. F I
 H O 3 M 7 / 3 0 (2 0 0 6 . 0 1) H O 3 M 7 / 3 0 Z
 G O 8 C 1 7 / 0 0 (2 0 0 6 . 0 1) G O 8 C 1 7 / 0 0 Z

請求項の数 5 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2012-110904 (P2012-110904)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成24年5月14日 (2012.5.14)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2013-239852 (P2013-239852A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	平成25年11月28日 (2013.11.28)	(74) 代理人	100121706
審査請求日	平成26年9月24日 (2014.9.24)		弁理士 中尾 直樹
		(74) 代理人	100128705
			弁理士 中村 幸雄
		(74) 代理人	100147773
			弁理士 義村 宗洋
		(72) 発明者	白木 善史
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
			本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	鎌本 優
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日
			本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 圧縮信号復元装置、方法、プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

複数のチャネル k ($k = 1, 2, \dots, K$; K は 2 以上の予め定められた正整数) の信号について、各チャネルの信号が全てのチャネルに共通の信号(以下、「共通信号」という)と当該共通信号以外の信号(以下、「残信号」という)との和で表されるとき、

$k = 1, 2, \dots, K$ について、チャネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k は、元の信号 s_k の基底行列 S_k による表現 x_k に対して観測行列 A_k を用いて $y_k = A_k x_k = S_k s_k$ 、 $s_k = x_k$ 、 $A_k = S_k$ なる関係があるとして、

チャネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k をチャネルごとに独立に元の信号(以下、「仮の復元信号」という)を復元する仮伸長部と、

各チャネルの上記仮の復元信号 $s_{\sim k}$ から、上記共通信号に対する相対的な振幅の大きさと遅延量を表す振幅係数 $a_{k,c}$ と群遅延 $b_{k,c}$ を求める差異推定部と、

上記圧縮信号 y_k と、上記振幅係数 $a_{k,c}$ と、上記群遅延 $b_{k,c}$ と ($k = 1, 2, \dots, K$) を用いて、 を回転行列

【数 15】

$$\text{diag} \left[1, e^{\frac{2\pi j}{N}}, e^{\frac{4\pi j}{N}}, \dots, e^{\frac{2\pi(N-1)j}{N}} \right]$$

10

20

、 j を虚数単位、 N を元の信号のベクトルの要素数として、上記共通信号の周波数領域表現

【数 16】

$$x'_c = \begin{bmatrix} a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix}$$

10

を求める共通信号推定部と、

上記圧縮信号 y_k と、上記振幅係数 a_{kc} と、上記群遅延 b_{kc} と、上記共通信号の周波数領域表現 x'_c を用いて、上記圧縮信号 y_k と上記共通信号の周波数領域表現 x'_c に基づく値との差分 y_{dk} を得て、さらに当該差分 y_{dk} について圧縮センシングのアルゴリズムを適用して、時間領域表現である s'_{dk} を得て、当該 s'_{dk} と上記共通信号の時間領域表現との和によって、元の信号の推定値 s'_k を得る残信号推定部を含む圧縮信号復元装置。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の圧縮信号復元装置において、

さらに、上記共通信号の周波数領域表現 x'_c を用いて、行列 A_k から残信号を表現する基底行列または上記共通信号を表現する基底行列を推定する残信号基底推定部を含み、

20

上記共通信号推定部は、上記残信号基底推定部によって得られた基底行列に基づいて上記共通信号の周波数領域表現 x'_c を更新する処理を行うことを特徴とする圧縮信号復元装置。

【請求項 3】

請求項 2 に記載の圧縮信号復元装置において、

上記残信号基底推定部によって得られた基底行列に基づいて残信号が除去された圧縮信号を上記仮伸長部の入力とすることを特徴とする圧縮信号復元装置。

30

【請求項 4】

複数のチャネル k ($k = 1, 2, \dots, K$; K は 2 以上の予め定められた正整数) の信号について、各チャネルの信号が全てのチャネルに共通の信号(以下、「共通信号」という)と当該共通信号以外の信号(以下、「残信号」という)との和で表されるとき、

$k = 1, 2, \dots, K$ について、チャネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k は、元の信号 s_k の基底行列による表現 x_k に対して観測行列 A_k を用いて $y_k = A_k x_k = A_k s_k$ 、 $s_k = x_k$ 、 $A_k = A_k$ なる関係があるとして、

仮伸長部が、チャネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k をチャネルごとに独立に元の信号(以下、「仮の復元信号」という)を復元する仮伸長ステップと、

差異推定部が、各チャネルの上記仮の復元信号 $s_{\sim k}$ から、上記共通信号に対する相対的な振幅の大きさと遅延量を表す振幅係数 a_{kc} と群遅延 b_{kc} を求める差異推定ステップと、

40

共通信号推定部が、上記圧縮信号 y_k と、上記振幅係数 a_{kc} と、上記群遅延 b_{kc} と ($k = 1, 2, \dots, K$) を用いて、 を回転行列

【数 17】

$$\text{diag} \left[1, e^{\frac{2\pi j}{N}}, e^{\frac{4\pi j}{N}}, \dots, e^{\frac{2\pi(N-1)j}{N}} \right]$$

50

、 j を虚数単位、 N を元の信号のベクトルの要素数として、上記共通信号の周波数領域表現

【数 18】

$$x'_c = \begin{bmatrix} a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix}$$

10

を求める共通信号推定ステップと、

残信号推定部が、上記圧縮信号 y_k と、上記振幅係数 a_{kc} と、上記群遅延 b_{kc} と、上記共通信号の周波数領域表現 x'_c を用いて、上記圧縮信号 y_k と上記共通信号の周波数領域表現 x'_c に基づく値との差分 y_{dk} を得て、さらに当該差分 y_{dk} について圧縮センシングのアルゴリズムを適用して、時間領域表現である s'_{dk} を得て、当該 s'_{dk} と上記共通信号の時間領域表現との和によって、元の信号の推定値 s'_k を得る残信号推定ステップと

を含む圧縮信号復元方法。

【請求項 5】

請求項 1 から請求項 3 のいずれかに記載の圧縮信号復元装置としてコンピュータを機能させるためのプログラム。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、複数のチャネルの信号が圧縮された圧縮信号の復元技術に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、多数のセンサーを用いて環境（温度、照度など）や人間の行動などを逐一センシングし、その情報を活用しようという動きが高まっている。多数のセンサーをネットワークによって結び、お互いに通信すること或いは特定の中央受信装置へ情報を送ることを可能にしたシステムはセンサーネットワークと呼ばれる。

30

【0003】

このようなシステムでは、それぞれのセンサーは離れた位置に配置されており、その運用を簡便にするため無線通信を用いていることが多い。また、センサーの電源は電池を用い外部からの電源入力を得ていない場合も想定される。そのため、センサーが送信すべき情報をできる限り削減すること、およびセンサー自身における演算量を低減することが重要であり多くの提案がなされている（たとえば非特許文献 1）。

【0004】

一方で、センサーネットワークは多くのセンサーを有し、かつ、用途によってはそれらが非常に近接している場合がある。このような構成では、各センサーが計測した結果は、或る観点からすれば非常に似通っていることが期待される（図 7 参照。図 7 は、3 ch の生体信号（筋電信号）を重ねて表示したグラフであり、各チャネルの信号が非常に類似していることがわかる）。このため、例えば、分散情報源符号化や階層的に情報の相関を利用して送信すべき情報量をなるべく減らそうという試みがなされている。

40

【0005】

このような試みのなかで近年注目を受けているのが圧縮センシングという手法である（例えば非特許文献 2）。単一センサーでの圧縮センシングは測定の対象となる標本数 N の信号 s に比して少ない数 M の情報 $y = s$ （ s は $M \times N$ の行列）のみをもって、元の信号 s が或る基底行列 においての信号 s の表現 $x = s$ の非 0 要素が非常に少ない（以下、「疎である」と表現する）という仮定の下に復元を行うことで元の信号 s の厳密に等しい

50

s' を得ようとするものである。また、この拡張タイプとして測定結果にノイズが含まれているケースについては同様なアルゴリズムで近似的な解 s'' が得られることが分かっている。

【0006】

圧縮センシング技術において、センサーネットワークのような多数のセンサーが存在する場合に応用する提案はすでにいくつか存在している。そのうちの 하나가、各センサーによって得られた測定信号 s_k (k はセンサーの識別インデックス) を全てのセンサーに共通した信号 s_c とそれ以外の信号 $s_{d,k}$ の和で表現できると仮定したものである。このモデルにもいくつかの派生型があるが、例えば共通信号の基底行列での表現 $x_c = s_c$ が疎ではなく、一方で $x_{d,k} = s_k$ が全ての k に対して疎であるようなモデルがある。観測の対象となる信号がこのようなモデルで記述できる場合は、単独のセンサーでは信号が疎ではないために単一圧縮センシングの枠組みでは長さ M の情報 $y_k = \sum_k s_k$ から長さ N の情報 s_k を正確に復元することはできない。しかしながら、多数のセンサーがあることで互いに情報を補い合い送信すべき情報を削減することができる場合がある。

10

【0007】

各センサーは CPU など演算を行うことが可能であり、またメモリなどにデータを保持することも可能である。また、通常の無線送受信機あるいは可視光通信の送受信機を用い双方向ないし一方方向の通信を行うことができる。

【0008】

以下に、通常の圧縮センシングについて説明する。通常の圧縮センシングでは、下記の条件に基づいて元の信号の推定値を得る。

20

[条件] $y = Ax = s$ を満たすような量 $\|x\|_1$ を最小化する ... (1)

【0009】

ただし、 $\|\cdot\|_1$ はベクトル \cdot の絶対値和 (L1 ノルム) を表し、 y を観測ベクトル、 A 、 \cdot はそれぞれ圧縮行列、観測行列、基底行列とする。また $s = Ax$ であり、推定された推定信号 x から元の信号 s を計算することができる。

【0010】

また、上記条件に代えて、下記のような条件の問題に緩和することもできる。

$\|y - Ax\|_2 < \epsilon$ の下で量 $\|x\|_1$ を最小化する ... (2)

【0011】

30

ただし、 ϵ はあらかじめ決められた微小なスカラー量であり、 $\|\cdot\|_2$ はベクトル \cdot の二乗和である。

【0012】

これ以外にも、条件によっては上記と同様の効果を持ついくつかのアルゴリズムが発見されており (例えば非特許参考文献3)、本明細書ではこれらを総称して「通常の圧縮センシングのアルゴリズム」と呼ぶことにする。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0013】

【非特許文献1】D. Baron, M.B. Wakin, M.F. Duarte, S. Sarvotham, and R.G. Baraniuk. "Distributed compressed sensing," Rice Univ. Technical report, 2005.

40

【非特許文献2】Emmanuel J. Candes and Michael B. Wakin, "An Introduction To Compressive Sampling" IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, MARCH 2008.

【非特許文献3】J.A. Tropp, S.J. Wright, "Computational Methods for Sparse Solution of Linear Inverse Problems," Proceedings of the IEEE, vol.98, no.6, pp.948-958, June 2010.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0014】

各センサーが測定した信号 s_k (k はセンサーの識別インデックス) を全てのセンサー

50

に共通した信号 s_c とそれ以外の信号 s_{dk} の和で表現できると仮定したモデルにもいくつかの派生型があるが、例えば、共通信号の基底行列での表現 $x_c = s_c$ が疎ではなく、一方で $x_{dk} = s_k$ が全てのインデックス k に対して疎であるような信号モデルがある。このような信号モデルでも、多数のセンサーがある場合には、この信号モデルに基づいた復元を行うことによって、各々のセンサーについては長さ $M < N$ の情報 y_k を用いて元の情報 s_k を得ることが可能である場合がある。

【0015】

しかしながら、上記の信号モデルで観測信号のモデル化を行った場合、共通信号 s_c が全てのセンサーの間で厳密には共有されていないと、却って復元誤差を大きくしてしまう場合もありうる。

10

【0016】

従来の圧縮センシングでは共通信号が厳密に一致していない場合には共通信号の基底行列での表現 $x_c = s_c$ も疎であるという仮定を導入して近似的に復元問題を解こうという試みが行われてきたが、得られた情報を十分活用しているとは言い難い。

【0017】

本発明はこのような点に鑑みてなされたものであり、各チャンネル間で共通信号が厳密に一致していない場合においても、複数のチャンネルの信号が圧縮された圧縮信号の復元技術を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0018】

20

本発明の圧縮信号復元技術は、共通信号 s_c とともに振幅係数 a_{kc} 及び群遅延 b_{kc} を考慮した信号モデルに基づいて、これら2つの因子をチャンネルごとに推定することによって、より正確な信号復元を行う。

具体的には、複数のチャンネル k ($k = 1, 2, \dots, K$; K は2以上の予め定められた正整数) の信号について、各チャンネルの信号が全てのチャンネルに共通の信号(共通信号)と当該共通信号以外の信号(残信号)との和で表されるとし、 $k = 1, 2, \dots, K$ について、チャンネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k は、元の信号 s_k の基底行列による表現 x_k に対して観測行列 A_k を用いて $y_k = A_k x_k = A_k s_k$ 、 $s_k = A_k^{-1} y_k$ 、 $A_k = A_k$ なる関係があるとして、チャンネルごとに元の信号が圧縮された圧縮信号 y_k をチャンネルごとに独立に元の信号(仮の復元信号)を復元し[仮伸長処理]、各チャンネルの仮の復元信号 $s_{\sim k}$ から、共通信号に対する相対的な振幅の大きさと遅延量を表す振幅係数 a_{kc} と群遅延 b_{kc} を求め[差異推定処理]、圧縮信号 y_k と、振幅係数 a_{kc} と、群遅延 b_{kc} と ($k = 1, 2, \dots, K$) を用いて、 A_k を回転行列

30

【数1】

$$\text{diag} \left[1, e^{\frac{2\pi j}{N}}, e^{\frac{4\pi j}{N}}, \dots, e^{\frac{2\pi(N-1)j}{N}} \right]$$

、 j を虚数単位、 N を元の信号のベクトルの要素数として、共通信号の周波数領域表現

40

【数2】

$$x'_c = \begin{bmatrix} a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix}$$

を求め[共通信号推定処理]、圧縮信号 y_k と、振幅係数 a_{kc} と、群遅延 b_{kc} と、共通信号の周波数領域表現 x'_c を用いて、圧縮信号 y_k と共通信号との差分 y_{dk} を得て

50

、さらに当該差分 $y_{d,k}$ を復元して $s'_{d,k}$ を得て、当該 $s'_{d,k}$ と共通信号の時間領域表現との和によって、元の信号の推定値 s'_k を得る [残信号推定処理]。

【発明の効果】

【0019】

本発明に拠れば、本来必要な情報より少ない数の線形観測によってえられた情報を用いて、各チャンネルの振幅差や遅延量を推定することで、各チャンネルに含まれる共通信号が全く同一でなくチャンネルごとに振幅や群遅延量が異なっている場合においても原信号を従来よりも精度良く復元することができる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】センサーネットワークを示す図。

【図2】従来の圧縮センシングの枠組を示す図。

【図3】本発明の実施形態1の機能構成を示す図。

【図4】本発明の実施形態2の機能構成を示す図。

【図5】本発明の実施形態4の機能構成を示す図。

【図6】比較実験例：(a)元の信号、(b)TECC法、(c)本発明に拠る手法。

【図7】3chの生体信号の例。

【発明を実施するための形態】

【0021】

<記号の説明>

R : 実数の全体 (集合)

C : 複素数の全体 (集合)

N R : 観測対象のベクトルの大きさ

M R : 1chあたりの観測数

s_k C^N : k chの観測対象の元のベクトル表現

x_k C^N : k chの観測対象の基底行列での表現

y_k C^M : k chの観測結果のベクトル表現

s_c C^N : 全チャンネルに含まれる共通信号のベクトル表現

x_c C^N : 共通信号の基底行列での表現

$s_{d,k}$ C^N : k chの共通信号を取り除いた信号 (個別信号) のベクトル表現

$x_{d,k}$ C^N : 個別信号の基底行列での表現

$C^{N \times N}$: $s_k = x$ となるような基底行列

$C^{M \times N}$: $y_k = s_k$ となるような観測行列

A_k $C^{M \times N}$: $A_k = x_k$ で表せられる行列

$a_{k,m}$ R : m chを基準としたk chの振幅の大きさ

$b_{k,m}$ R : m chを基準としたk chの位相遅延の大きさ

【0022】

<従来の信号モデルによる圧縮センシング>

実施形態の説明に先立ち、図1と図2を用いて従来の信号モデルによる圧縮センシングについて述べる。

【0023】

図1のようにK個 (Kは2以上の正整数) のセンサーと1個の中央受信機950で構成されるシステムを考える。センサー910-1、センサー910-2、...、センサー910-Kはそれぞれ異なった信号を計測し、中央受信機920へ送信する。ここで各センサーが或る単位時間に取得する情報を複素ベクトルで表すこととし、このベクトルの長さはN (Nは正の整数) であるとする。すなわち、或る単位時間にK個のセンサーが取得した情報は一般に各々 $s_k \in C^N$ 、 $k = 1, 2, \dots, K$ と書けるとする。

【0024】

図2のように、各センサー910は観測装置911と送信装置913で構成されている。観測装置911はふたつの部分、測定部9111と圧縮部9112で構成されている。

10

20

30

40

50

測定部 9 1 1 1 は、信号（例えば音声信号や生体信号などであり、特に限定はない）を観測し、単位時間の長さ N の信号 s_k を出力する。圧縮部 9 1 1 2 は、信号 s_k を長さ M の圧縮された信号 $y_k \in \mathbb{C}^M$ に変換する。ただし、 M は N より小さな正の整数である。また、この変換は線形変換であるとする。すなわち、観測行列 $A_k \in \mathbb{C}^{M \times N}$ によって式 (5) のように書けるとする。

$$y_k = A_k s_k \quad \dots (5)$$

【0025】

送信装置 9 1 3 は、符号化部 9 1 3 1 によって圧縮信号 y_k を通信路符号化して中央受信機 9 5 0 に送信する。

【0026】

中央受信機 9 5 0 は、各センサーから、それぞれ通信路符号化された K 個の符号列を受信する。中央受信機 9 5 0 は、受信装置 9 5 1 と復元装置 9 5 3 で構成されている。受信装置 9 5 1 の復号部 9 5 1 1 は、各センサーから受信した符号列をそれぞれ復号して圧縮信号 y_k 、 $k = 1, 2, \dots, K$ を出力する。

【0027】

復元装置 9 5 3 は各行列 A_k 、 $k = 1, 2, \dots, K$ 及び s_c を既知とする。また、各圧縮行列 A_k は、式 (6) のような行列の積で表すことができ、 A_k をセンサー k の観測行列、 C_k を基底行列と呼ぶこととする。

$$A_k = C_k A_{k0} \quad C_k \in \mathbb{C}^{M \times N}, \quad A_{k0} \in \mathbb{C}^{N \times N}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad \dots (6)$$

【0028】

復元装置 9 5 3 は、これら圧縮行列 A_k についても既知であるとする。

【0029】

従来技術では、ここで下記のような特別な場合を考えていた。すなわち、或る単位時間に得られた信号 s_k 、 $k = 1, 2, \dots, K$ は、式 (7) のように全てのセンサーに共通した信号 s_c とそれ以外の部分 s_{d_k} で表すことができ、かつ、基底行列 A_{k0} における s_{d_k} の表現 x_{d_k} (式 (8) 参照) は非ゼロ要素が少ない疎なベクトルであるという信号モデルである。

$$s_k = s_c + s_{d_k} \quad \dots (7)$$

$$s_{d_k} = A_{k0} x_{d_k} \quad \dots (8)$$

【0030】

このとき復元装置 9 5 3 を構成する共通信号推定部 9 5 3 1 によって共通信号の基底行列 A_{k0} における表現 x'_c は式 (9) のように推定される (例えば非特許参考文献 1)。

$[\cdot]^*$ は行列 $[\cdot]$ のエルミート共役行列を表す。

【数 3】

$$x'_c = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_K \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} \quad \dots(9)$$

【0031】

復元装置 9 5 3 を構成する残信号推定部 9 5 3 2 は、圧縮行列 A_k と、式 (9) に従って得られた x'_c と、観測信号 y_k とから式 (10) に従って残信号 y'_{d_k} を計算し、 y'_{d_k} と A_k に対して通常の圧縮センシングのアルゴリズムを適用することで x'_{d_k} を再構成する。

$$y'_{d_k} = y_k - A_k x'_c \quad \dots (10)$$

【0032】

残信号推定部 9 5 3 2 は、すべてのチャンネル ($k = 1, 2, \dots, K$) について残信号 y'_{d_k} を推定する。さらに、 x'_c と x'_{d_k} の和 x'_k から元の基底による数ベクトル空間への変換、すなわち

10

20

30

40

50

$$s'_k = x'_k \dots (11)$$

を計算し、元の信号の推定値 s'_k を各チャンネルについて得る。

【0033】

上述した従来の信号再構成の方法は、下記のような信号モデルを前提としている。すなわち、各チャンネルの測定信号 s_k は、共通信号 s_c と基底行列において疎な信号 s_{dk} の和

$$s_k = s_c + s_{dk} \dots (12)$$

と表現される信号モデルである。しかしながら、音響信号や生体信号などの場合においては観測地点の違いなどから各チャンネル間において共通信号 s_c に相当する部分に振幅の違いや位相の違いがありうる。この信号モデルではこれらの影響を無視してしまっているため、実際の信号をよくモデル化しているとは言い難く、結果として上述した再構成方法では単チャンネルの圧縮センシングによる再構成方法に比しても必ずしも性能が向上しない場合がある。このような課題に対する解決方法はいまだ提示されたことがない。

【0034】

<本発明の原理>

本発明は、下記に述べるように共通信号に振幅の違いや位相の違いがある場合でも、多チャンネルの情報を利用することで効率的に信号を再構成することができるようにしたことを特徴としている。ここで、全実施形態に共通する信号モデルについて記述しておく。

【0035】

本発明では、信号モデルを共通信号 s_c とともに振幅係数 a_{kc} 及び群遅延 τ_{kc} も考慮した信号モデルに拡張した上でこれら2つの因子をチャンネルごとに推定することによって、より正確な信号再構成を行うことを特徴としている。具体的には、各信号の離散フーリエ変換(DFT)が

$$x_k = x_{ck} + x_{dk} \dots (13)$$

という和の形式で書けるとすると、式(14)で近似することができるという信号モデルである。

【数4】

$$x_{ck} \approx a_{kc} \Lambda^{b_{kc}} x_c \dots (14)$$

【0036】

ただし、は式(15)で表される。は円周率、 j は虚数単位である。

【数5】

$$\text{diag} \left[1, e^{\frac{2\pi j}{N}}, e^{\frac{4\pi j}{N}}, \dots, e^{\frac{2\pi(N-1)j}{N}} \right] \dots (15)$$

【0037】

上記の式を合わせると、元の信号の離散フーリエ変換は式(16)で近似的に記述できることを前提としている。

【数6】

$$x_k \approx a_{kc} \Lambda^{b_{kc}} x_c + x_{dk} \dots (16)$$

【0038】

[実施形態1]

図3を参照して、実施形態1について説明する。実施形態1において観測装置と送信装置と受信装置は既述の従来技術と同じ構成および処理であるから説明を省略する。本発明の実施形態は、従来の復元装置953に替えて復元装置100を備える。

【0039】

以下では、復元装置100が、受信装置951から受けた信号ベクトル y_k 、圧縮行列 A_k 、観測行列 B_k 、基底行列 C_k を知っているものとする(例えば、復元装置100が事

10

20

30

40

50

前に各センサーから各行列についての情報を受信している)。ただし、 $k = 1, 2, \dots, K$ であり、下記では基底行列を離散フーリエ変換に対応する行列とする。

【0040】

実施形態1では、復元装置100は、仮伸長部101、差異推定部103、共通信号推定部105、残信号推定部107を有する。

【0041】

仮伸長部101は、信号ベクトル y_k から仮の信号の再構成を行う。この処理には、通常の圧縮センシングのアルゴリズムが用いられる。これによって仮の復元信号 $s_{\sim 1}, s_{\sim 2}, \dots, s_{\sim K}$ を得る。

【0042】

差異推定部103は、 $s_{\sim 1}, s_{\sim 2}, \dots, s_{\sim K}$ を用いて下記のように振幅及び位相の差異を推定する。具体的には、差異推定部103は、式(17)で表される量を最小化することで各チャネル間の相対的な振幅の差 a_{km} と群遅延量 b_{km} を推定する。

【数7】

$$\|y_k - a_{km} \Phi_k [\text{IDFT}] \Lambda^{b_{km}} [\text{DFT}] \tilde{s}_m\|_2 \quad \dots (17)$$

【0043】

ここで[DFT]および、[IDFT]はそれぞれ離散フーリエ変換、逆離散フーリエ変換に対応する変換行列である。上記の量は a_{km} と b_{km} を別々に変化させることで最適化することが可能である。

【0044】

差異推定部103は、さらに、

$a_k = (a_{km} + 1/a_{mk})/2, \quad k = (k_m - m_k)/2 \quad \dots (18)$
とする。この処理は推定誤差を軽減するためのものであるが、この処理を行わず、

$k = k_m, \quad k = k_m$
としてもよい。

また、 k_m は、例えば

$$k_m = a_{12} + a_{23}$$

を近似的に満たすので、この観点から k_m に関するコスト関数

$$\|a_{km} - (a_{kj} + a_{jm})\|_2 \quad \dots (19)$$

を最小化するように a_{km} の組を調整し推定誤差を軽減してもよい。また上の関係式からさらに4項以上の k_m の組によるコスト関数を立てることができるので、このようなコスト関数を最小化するように a_{km} の組を調整し推定誤差を軽減してもよい。

【0045】

差異推定部103は、さらに、

$$a_k = 1, \quad b_k = 0 \quad \dots (20)$$

となるように正則化を行う。この正則化によって得られた係数を a_{kc}, b_{kc} とする。ただし、上述の方法の正則化に限らず、或る定められたベクトルと各チャネル間の相対的な振幅の差と群遅延量の両方の情報を含めることができれば、どのような正則化を用いてもよい。例えば、特定のチャネルを共通ベクトルとみなして、そのベクトルからの振幅の差と群遅延量を a_{kc}, b_{kc} としてもよい。

【0046】

次に、共通信号推定部105は、上記の係数 a_{kc}, b_{kc} 及び観測された信号 y_1, y_2, \dots, y_K を用いて式(21)を計算する。ただし、 $[\cdot]^\dagger$ は行列 $[\cdot]$ の一般化逆行列を表す。

10

20

30

40

【数 8】

$$x'_c = \begin{bmatrix} a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} \quad \dots(21)$$

【0047】

残信号推定部 107 は、上記共通信号推定部 105 で求めた x'_c を用いて、式(22)に従って観測信号 y_k との差分 y_{dk} を得る。

10

【数 9】

$$y_{dk} = y_k - a_{kc} A_k \Lambda^{b_{kc}} x'_c \quad \dots(22)$$

【0048】

この y_{dk} と A_k について通常の圧縮センシングのアルゴリズムを適用することによって s'_{d1} 、 s'_{d2} 、 \dots 、 s'_{dK} を得る。さらにこれらと x'_c 、 a_{kc} 、 b_{kc} を用いることで、元の信号の推定値 s'_k を得る(式(23))。

【数 10】

$$s'_k = s'_{dk} + a_{kc} [\text{IDFT}] \Lambda^{b_{kc}} x'_c \quad \dots(23)$$

20

【0049】

以上によって復元装置 100 は元の信号よりも少ない情報 y_1 、 y_2 、 \dots 、 y_K から元の信号の推定値 s'_1 、 s'_2 、 \dots 、 s'_K を得ることができる。

【0050】

[実施形態 2]

実施形態 1 では全ての処理を各チャネルについて一度だけ行うものであったが、一連の処理を反復的に行うことによって推定精度を向上させることができる。実施形態 2 を、図 4 を参照して説明する。なお、復元装置 100 以外の構成は実施形態 1 と同様である。

【0051】

仮伸長部 101 と差異推定部 103 の処理は実施形態 1 と同様である。共通信号推定部 105 は実施形態 1 と異なり、式(24)を計算することによって共通信号を求める。

30

【数 11】

$$x'_c = \begin{bmatrix} Q_1^* a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ Q_2^* a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ Q_K^* a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} Q_1^* y_1 \\ Q_2^* y_2 \\ \vdots \\ Q_K^* y_K \end{bmatrix} \quad \dots(24)$$

40

【0052】

ただし、ここで Q_k は、初期値がサイズ $M \times M$ の単位行列であり、後述する残信号基底推定部 109 によって更新される。

【0053】

残信号基底推定部 109 は、残信号推定部 107 と同様の手続きで個別信号 x_{dk} を推定し、さらに下記のような処理を行う(例えば非特許文献 1)。この処理の説明に先立ち、前提事項について説明を加えておく。

【0054】

行列 B_k $C^{M \times M}$ を、当該行列の列ベクトル(或いは行ベクトル)によって張られる数ベクトル空間に信号 y_k が含まれるような基底行列とする(換言すれば、信号 y_k が行

50

列 B_k の列ベクトル (或いは行ベクトル) の線形結合で表現される) 。このとき基底行列 B_k は下記のように 2 つの部分に分けることができる。

$$B_k = [A_{k (k)} \quad Q_k] \quad \dots (25)$$

【 0 0 5 5 】

ここで $A_{k (k)}$ は圧縮行列 A_k の一部を列単位で切り取った得た行列で、 (k) は切り取った列を特定するインデックスを表している。なお、 Q_k は $A_{k (k)}$ を構成するすべての列ベクトルに直交した列ベクトルからなる基底行列である。

【 0 0 5 6 】

残信号基底推定部 1 0 9 は、予め決められた個数 D_k ($k = 1, 2, \dots, K$) に従って圧縮行列 A_k のうち y_{d_k} を 2 乗誤差の観点から良く記述している D_k 個の列を特定するインデックス (t_k) を決定し、これと現在の (k) との積集合を新たに (k) として、行列 Q_k を更新する。ただし (k) の初期値は空集合である。また、 Q_k の初期値は $M \times M$ の単位行列である。下記に残信号基底推定部 1 0 9 の処理の具体例を示す。

10

1 . y_{d_k} を用いて通常の圧縮センシングのアルゴリズムを実行して x_{d_k} を取得する。すなわち、

- 1 . $\|y_{d_k} - A_k x_{d_k}\|_2 < \epsilon$ の下で量 $\|x_{d_k}\|_1$ を最小化する、という問題を解く。
- 2 . ステップ 1 . で得られた x_{d_k} の要素のうちそれら各要素の絶対値の大きさを比較する。このうち上位 D_k 個の x_{d_k} の要素のインデックスを (t_k) として保持する。
- 3 . (t_k) と (k) との積集合を新たな (k) として保持する。
- 4 . $A_{k (k)}$ に対する直交基底 Q_k を計算する。

20

【 0 0 5 7 】

このようにして得られる行列 Q_k は大きさが $M \times (M - | (k) |)$ の行列となる。 D_k は反復のたびに変更してもよい。また、積集合の代わりに和集合を用いて (k) を更新してもよい。この場合は (k) の大きさが過大にならないように、上限 E_k を設けることが望ましい。

【 0 0 5 8 】

残信号基底推定部 1 0 9 は、行列 Q_k を共通信号推定部 1 0 5 に渡す。以下、あらかじめ定めた反復回数に達するまで、残信号基底推定部 1 0 9 と共通信号推定部 1 0 5 との間で共通信号 x'_c と基底行列 Q_k の更新を行う。

【 0 0 5 9 】

30

反復終了後に残信号推定部 1 0 7 は a_{kc} 、 b_{kc} 、 x'_c 及び観測行列 A_k 、基底行列 Q_k 、観測結果 y_k を用いて、実施形態 1 と同様に残差信号を推定し、最後に再構成した復元信号 s'_1 、 s'_2 、 \dots 、 s'_K を出力する。

【 0 0 6 0 】

[実施形態 3]

上記実施形態 2 において共通信号推定部 1 0 5 の処理 (式 (2 4)) を下記のように置き換えることも可能である。すなわち、

$$y_{\sim k} = y_k - y_{\sim d_k} \quad \dots (26a)$$

という減算によって残差信号の影響を除去した上で共通信号

【 数 1 2 】

40

$$x'_c = \begin{bmatrix} a_{1c} A_1 \Lambda^{b_{1c}} \\ a_{2c} A_2 \Lambda^{b_{2c}} \\ \vdots \\ a_{Kc} A_K \Lambda^{b_{Kc}} \end{bmatrix}^\dagger \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \vdots \\ \tilde{y}_K \end{bmatrix} \quad \dots(26b)$$

を推定する。ただし、 $y_{\sim d_k}$ は、実施形態 2 における残信号基底推定部 1 0 9 で得られた $A_{k (k)}$ の基底のみで残差 y_{d_k} を近似したベクトルである。すなわち、 $y_{\sim d_k}$ は、

50

$$x_{d k} (k) = A_k (k)^\dagger y_{d k}$$

として

$$y_{d k} = A_k x_{d k}$$

で表される。

【0061】

[実施形態4]

実施形態2または実施形態3では、仮伸長部101による処理は始めに一度だけ実行されるだけであるが、図5に示すように、個別信号を除去した信号を用いて仮伸長部101で再び通常の圧縮センシングのアルゴリズムで仮の復元信号 $s_{\sim 1}$ 、 $s_{\sim 2}$ 、...、 $s_{\sim k}$ を得ることも可能である。このようにして、残信号の基底更新ごとに新たに仮の復元信号を用いて差異推定部103によって $a_{k c}$ や $b_{k c}$ を推定することができる。

10

【0062】

具体的には実施形態2で定義した残信号の基底を取り除く行列 Q_k を用いて

$$Q_k y_k = Q_k A_k x_k \quad \dots (27)$$

を考えれば、 y_k の代わりに $Q_k y_k$ を観測結果、 $Q_k A_k$ を観測の際に用いた圧縮行列であるとみなすことによって通常の圧縮センシングのアルゴリズムによって仮の復元信号 $s_{\sim k}$ の再構成を行うことができる。

【0063】

また、式(27)による上記の方法に代えて、単なる減算処理を行ってもよい。具体的には

20

$$y_{c k} = y_k - A_k x'_{d k} \quad \dots (28)$$

を観測結果として用い、 A_k はそのまま用いて、仮伸長部101で通常の圧縮センシングのアルゴリズムを用いることで仮の復元信号 $s_{\sim k}$ を得ることができる。

再度得られたこれら仮の復元信号 $s_{\sim 1}$ 、 $s_{\sim 2}$ 、...、 $s_{\sim k}$ は差異推定部103に送られる。

【0064】

[実施形態5]

上記実施形態2～4では反復処理の回数は適当な固定値であった。しかし、終了条件判定部(図示せず)を設けることで残差信号の基底更新が行われなくなったことをもって反復処理を終了することも可能である。すなわち、今回処理の残信号基底推定部109の出力(行列 Q_k)が前回処理の残信号基底推定部109の出力(行列 Q_k)と同じであれば反復を終了し残信号推定部107に結果を渡すようにすることが可能である。

30

【0065】

[実施形態6]

上記実施形態1～4について、送信装置や受信装置を用いるのではなく、観測装置で得た結果 y_k を外部記憶装置に記録しておき、当該外部記憶装置から得た観測結果 y_k を用いて復元装置で復元してもよい。また、各装置の間に適当な外部記憶装置を介在させ、各装置で得られた情報を外部記憶装置に保持させる処理を含めてもよい。

【0066】

[実施形態7]

40

実施形態1～6では $s_{d k}$ が疎になる基底が離散フーリエ変換であるとしてきた。しかし、これを一般的な基底に拡張しても、フーリエ領域(周波数領域)との間に変換行列を規定することができるので、下記のように僅かな変更を実施形態1～6を適用することができる。

【0067】

以下では $z_{d k} = s_{d k}$ とし、 $z_{d k}$ を $s_{d k}$ の基底での表現とし、これが疎であるとする。 $x_k = [\text{DFT}] s_k$ は引き続き、 s_k の離散フーリエ変換とする。実施形態1～6の共通信号推定部105では、 $A_k = A_k$ のかわりに $O_k = O_k [\text{IDFT}]$ を使えば x_c はフーリエ領域の表現になる。 y_k はそのままよい。残信号推定部107と残信号基底推定部109では残差を

50

【数 1 3】

$$y_{dk} = y_k - a_{kc} A_k \Lambda^{b_{kc}} x'_c \quad \dots(29)$$

としたが、これを

【数 1 4】

$$y_{dk} = y_k - a_{kc} O_k \Lambda^{b_{kc}} x'_c \quad \dots(30)$$

に置き換えればよい。これらの推定部で通常の圧縮センシングのアルゴリズムを適用する際には圧縮行列を $A_k =$ とし、

$\|y_{dk} - A_k z\|_2 <$ の下で量 $\|z\|_1$ を最小化するという条件の問題を解いて得られる z を z_{dk} とする。

【0068】

図6は従来法と本発明による手法との性能差を表わしている。TECCアルゴリズムは非特許参考文献1による従来のアルゴリズムである。比較結果からわかるように実際の信号に対して本発明による手法は従来法よりもSNRが良い。

【0069】

<復元装置のハードウェア構成例>

上述の実施形態に関わる復元装置は、CPU (Central Processing Unit) やDSP (Digital Signal Processor) [キャッシュメモリなどを備えていてもよい]、メモリであるRAM (Random Access Memory) やROM (Read Only Memory) と、ハードディスクである外部記憶装置、並びにこれらのCPUやDSP、RAMやROM、外部記憶装置間のデータのやり取りが可能ないように接続するバスなどを備えている。また必要に応じて、音響再生装置に、CD-ROMなどの記憶媒体を読み書きできる装置(ドライブ)などを設けるとしてもよい。

【0070】

復元装置の外部記憶装置には、上述の復元処理のためのプログラム並びにこのプログラムの処理において必要となるデータ(圧縮行列、観測行列、基底行列、回転行列)などが記憶されている[外部記憶装置に限らず、例えばプログラムを読み出し専用記憶装置であるROMに記憶させておくなどでもよい]。また、これらのプログラムの処理によって得られるデータなどは、RAMや外部記憶装置などに適宜に記憶される場合がある。データやその格納領域のアドレスなどを記憶する記憶装置を単に「記憶部」と呼ぶことにする。

【0071】

復元装置の記憶部には、圧縮信号 y_k をチャンネルごとに独立に元の信号(仮の復元信号)を復元するためのプログラム、仮の復元信号 $s_{\sim k}$ から、振幅係数 a_{kc} と群遅延 b_{kc} を求めるためのプログラム、圧縮信号 y_k と、振幅係数 a_{kc} と、群遅延 b_{kc} とを用いて共通信号の周波数領域表現を求めるためのプログラム、圧縮信号 y_k と、振幅係数 a_{kc} と、群遅延 b_{kc} と、共通信号の周波数領域表現 x'_c を用いて、圧縮信号 y_k と共通信号との差分 y_{dk} を得て、さらに当該差分 y_{dk} を復元して s'_{dk} を得て、当該 s'_{dk} と共通信号の時間領域表現との和によって、元の信号の推定値 s'_k を得るためのプログラムなどが記憶されている。

【0072】

復元装置では、記憶部に記憶された各プログラムとこの各プログラムの処理に必要なデータが必要に応じてRAMに読み込まれて、CPUで解釈実行・処理される。この結果、CPUが所定の機能(仮伸長部、差異推定部、共通信号推定部、残信号基底推定部、残信号推定部など)を実現することで上述の音響再生が実現される。

【0073】

<補記>

10

20

30

40

50

本発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更が可能である。また、上記実施形態において説明した処理は、記載の順に従って時系列に実行されるのみならず、処理を実行する装置の処理能力あるいは必要に応じて並列的あるいは個別に実行されるとしてもよい。

【0074】

また、上記実施形態において説明したハードウェアエンティティ（復元装置）における処理機能をコンピュータによって実現する場合、ハードウェアエンティティが有すべき機能の処理内容はプログラムによって記述される。そして、このプログラムをコンピュータで実行することにより、上記ハードウェアエンティティにおける処理機能がコンピュータ上で実現される。

10

【0075】

この処理内容を記述したプログラムは、コンピュータで読み取り可能な記録媒体に記録しておくことができる。コンピュータで読み取り可能な記録媒体としては、例えば、磁気記録装置、光ディスク、光磁気記録媒体、半導体メモリ等のようなものでもよい。具体的には、例えば、磁気記録装置として、ハードディスク装置、フレキシブルディスク、磁気テープ等を、光ディスクとして、DVD（Digital Versatile Disc）、DVD-RAM（Random Access Memory）、CD-ROM（Compact Disc Read Only Memory）、CD-R（Recordable）/RW（ReWritable）等を、光磁気記録媒体として、MO（Magneto-Optical disc）等を、半導体メモリとしてEEPROM（Electrically Erasable and Programmable-Read Only Memory）等を用いることができる。

20

【0076】

また、このプログラムの流通は、例えば、そのプログラムを記録したDVD、CD-ROM等の可搬型記録媒体を販売、譲渡、貸与等することによって行う。さらに、このプログラムをサーバコンピュータの記憶装置に格納しておき、ネットワークを介して、サーバコンピュータから他のコンピュータにそのプログラムを転送することにより、このプログラムを流通させる構成としてもよい。

【0077】

このようなプログラムを実行するコンピュータは、例えば、まず、可搬型記録媒体に記録されたプログラムもしくはサーバコンピュータから転送されたプログラムを、一旦、自己の記憶装置に格納する。そして、処理の実行時、このコンピュータは、自己の記録媒体に格納されたプログラムを読み取り、読み取ったプログラムに従った処理を実行する。また、このプログラムの別の実行形態として、コンピュータが可搬型記録媒体から直接プログラムを読み取り、そのプログラムに従った処理を実行することとしてもよく、さらに、このコンピュータにサーバコンピュータからプログラムが転送されるたびに、逐次、受け取ったプログラムに従った処理を実行することとしてもよい。また、サーバコンピュータから、このコンピュータへのプログラムの転送は行わず、その実行指示と結果取得のみによって処理機能を実現する、いわゆるASP（Application Service Provider）型のサービスによって、上述の処理を実行する構成としてもよい。なお、本形態におけるプログラムには、電子計算機による処理の用に供する情報であってプログラムに準ずるもの（コンピュータに対する直接の指令ではないがコンピュータの処理を規定する性質を有するデータ等）を含むものとする。

30

40

【0078】

また、この形態では、コンピュータ上で所定のプログラムを実行させることにより、ハードウェアエンティティを構成することとしたが、これらの処理内容の少なくとも一部をハードウェア的に実現することとしてもよい。

【図1】

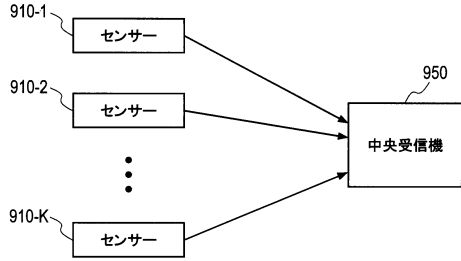


図1

【図2】

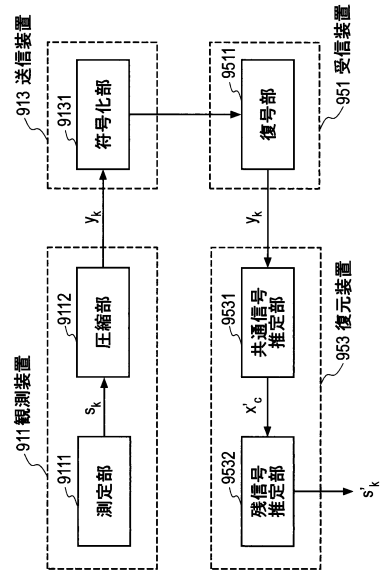


図2

【図3】

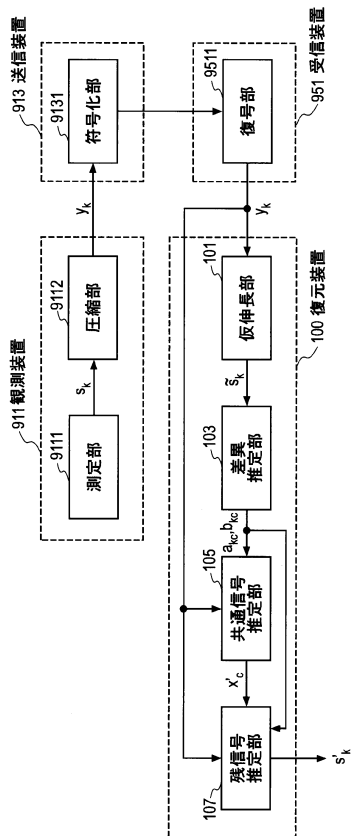


図3

【図4】

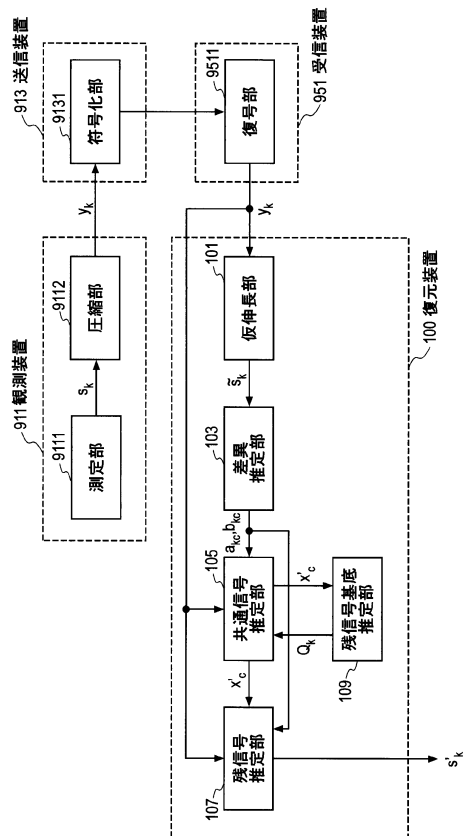


図4

【 図 5 】

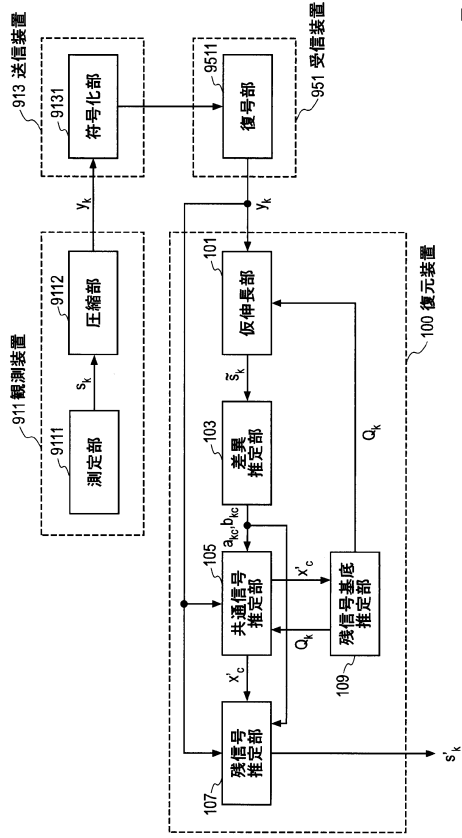


図5

【 図 6 】

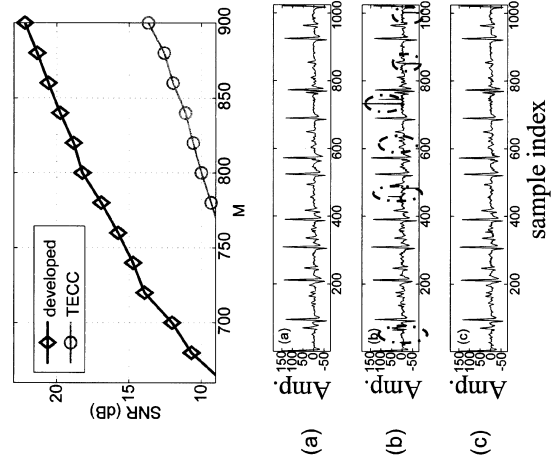


図6

【 図 7 】

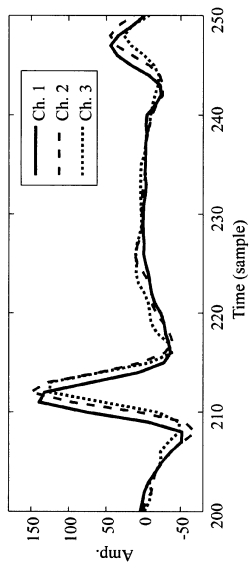


図7

フロントページの続き

- (72)発明者 佐藤 尚
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 ガブリエル パブロ ナバ
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 守谷 健弘
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 北村 智彦

- (56)参考文献 国際公開第2010/111748(WO, A1)
国際公開第2010/068922(WO, A1)
特開2011-096240(JP, A)
Wei Chen, Miguel R. D. Rodrigues, Ian J. Wassell, Distributed Compressive Sensing Reconstruction Via Common Support Discovery, Communications(ICC), 2011 IEEE International Conference on, 2011年6月, pp.1-5
Delaram Motamedvaziri, Venkatesh Saligrana, David Castanon, Decentralized Compressive Sensing, Communication, Control, and Computing(Allerton), 2010 48th Annual Allerton Conference on, 2010年10月, pp.607-614

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H03M 3/00 - 11/00
G08C 17/00
IEEE Xplore