

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-135735  
(P2009-135735A)

(43) 公開日 平成21年6月18日(2009.6.18)

(51) Int. Cl.  
H03M 13/19 (2006.01)

F I  
H03M 13/19

テーマコード(参考)  
5J065

審査請求 有 請求項の数 6 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2007-309903 (P2007-309903)  
(22) 出願日 平成19年11月30日(2007.11.30)

(71) 出願人 000002130  
住友電気工業株式会社  
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号  
(74) 代理人 110000280  
特許業務法人サンクレスト国際特許事務所  
(72) 発明者 前島 貴  
大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号  
住友電気工業株式会社大阪製作所内  
Fターム(参考) 5J065 AD01 AD07 AH01

(54) 【発明の名称】 復号器、受信装置及び符号化データの復号方法

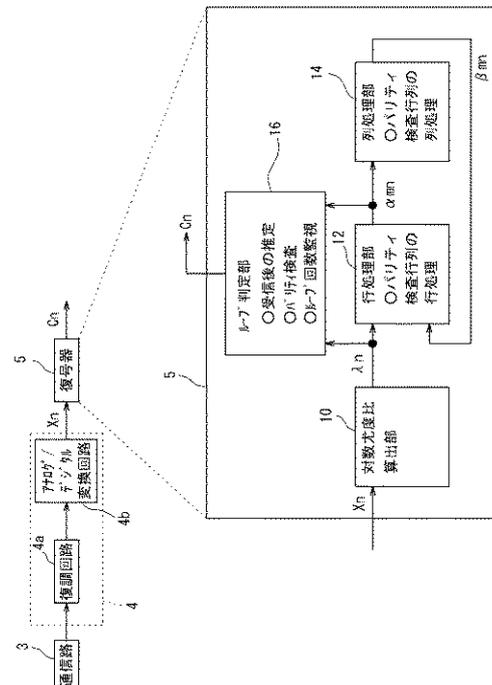
(57) 【要約】

【課題】 演算負荷を増大させずに効率よくスケールリングを行うことができるLDPC符号の復号器を提供する。

【解決手段】 本発明は、LDPC符号よりなる符号化データ $X_n$ に対して、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式による誤り訂正復号を行って復号データ $C_n$ を得る復号器5に関する。

この復号器5は、符号化データ $X_n$ に行処理演算を行う行処理部12と、行処理演算の結果得られたデータに列処理演算を行う列処理部14と、行処理部12における行処理演算で生成される非監視値 $S_1$ に基づいて、次の列処理演算に用いる変数 $\lambda_n$ をスケールリングするスケールリング処理部26とを備える。

【選択図】 図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

L D P C 符号よりなる符号化データに対して、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式に基づく誤り訂正復号を行って復号データを得る復号器であって、  
前記符号化データに行処理演算を行う行処理部と、  
行処理演算の結果得られたデータに列処理演算を行う列処理部と、  
前記行処理部における行処理演算で生成される被監視値に基づいて、次の列処理演算に用いる変数をスケーリングするスケーリング処理部とを備えていることを特徴とする復号器。

**【請求項 2】**

前記列処理演算に必要な外部値対数比は、対数尤度比と事前値対数比との和の絶対値の第 1 最小値と第 2 最小値を用いて演算されるものであり、  
前記スケーリング処理部は、前記第 2 最小値を前記被監視値とする監視部と、この監視部で検出された前記第 2 最小値が所定値を超えた場合に前記変数をスケーリングするスケーリング部とを有する請求項 1 に記載の復号器。

10

**【請求項 3】**

前記列処理演算に必要な外部値対数比は、対数尤度比と事前値対数比との和の絶対値の第 1 最小値と第 2 最小値を用いて演算されるものであり、  
前記スケーリング処理部は、前記第 1 最小値の最下位ビット値を前記被監視値とする監視部と、この監視部で検出された最下位ビット値がゼロである場合に前記変数をスケーリングするスケーリング部とを有する請求項 1 に記載の復号器。

20

**【請求項 4】**

前記監視部は、更に前記第 2 最小値の最下位ビット値を前記被監視値としており、  
前記スケーリング部は、前記監視部で検出された双方の最下位ビット値がいずれもゼロである場合に前記変数をスケーリングする請求項 3 に記載の復号器。

**【請求項 5】**

通信路に伝送された符号化データを受信して復号する受信装置であって、  
受信した前記符号化データをデジタル復調する復調器と、  
復調された前記符号化データのデジタル信号を復号する前記項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の復号器とを備えていることを特徴とする受信装置。

30

**【請求項 6】**

L D P C 符号よりなる符号化データに対して、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式に基づく誤り訂正復号を行って復号データを得る符号化データの復号方法であって、  
行処理演算で生成される被監視値に基づいて、次の列処理演算に用いる変数をスケーリングすることを特徴とする符号化データの復号方法。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、サムプロダクト法を簡略化した復号方式に基づく誤り訂正復号を行う復号器等に関するものである。

40

**【背景技術】****【0002】**

デジタル通信の分野では、有線及び無線を問わず、高速通信、低消費電力及び高い通信品質（ビット誤り率）が望まれている。誤り訂正技術は、これらの要求を満足させるための技術の一つとして、無線、有線及び記録システム等において幅広く利用されている。

かかる誤り訂正技術の一つとして、低密度パリティ検査（L D P C : Low-Density Parity-Check）符号と、その復号法であるサムプロダクト（sum-product）復号法とが注目されている（非特許文献 1）。

**【0003】**

この L D P C 符号では、白色ガウス通信路のシャノン（Shannon）限界まで、0 . 0 0

50

4 dB という復号特性が得られることが知られている。また、サムプロダクト復号法は、並列処理による復号処理を実行するため、符号長を長くすることができるとともに、処理能力を向上させることができる。

このLDPC符号の復号処理を実現する回路技術については、和田山正やEnring Yaoらによってそのハード構成が示されている（非特許文献1及び2）。

【0004】

一方、LDPC符号の復号アルゴリズムとしては、上記サムプロダクト復号法を簡略化したミニサム（min-sum）復号法が考案されており（特許文献1）、また、本出願の発明者は、これより更に簡略化された復号方式として、FUMP-APP（Fast Uniformly Most Powerful-A Posteriori Probability）復号法を公表している（非特許文献3）。

10

【0005】

【特許文献1】特開2005-269535号公報

【非特許文献1】和田山正 「低密度パリティ検査符号とその復号法について」 信学技報

【非特許文献2】Engling Yeo “VLSI Architectures for Iterative Decoders in Magnetic Recording Channels” IEEE Trans. On Magnetics, vol.37, NO2. March 2001

【非特許文献3】前畠貴 “FUMP-APP復号法によるLDPC復号器の実装” 信学技報,CAS2006,pp8-20,June 2006

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

20

【0006】

LDPC符号の復号処理を固定小数点のデジタル信号処理で実施する場合、取り扱う数値にアンダーフローやオーバーフローによる誤差が生じないように回路設計を行う必要がある。

しかしながら、LDPC符号の復号処理では、受信データが正しかった場合には、反復計算を実施する毎にその計算に関連する変数（事前値対数比等）の絶対値が大きくなるという固有の問題がある。LDPC符号の復号処理では信頼度情報の更新を行っており、受信データが正しい場合には常に信頼度が増加するからである。

【0007】

このため、LDPC符号の復号処理においては、反復処理が進み受信データに含まれる誤りが訂正され始めると、反復計算に関連する数値が急激に大きくなる傾向にある。

30

そこで、反復計算の関連数値（復号処理に用いる各変数： $\gamma$  や  $\lambda$ ）が大きくなり過ぎないようにするのに、その関連数値のスケーリングを行えばよいとされているが、このスケーリングを復号処理における反復計算と同時に行うには、非常に多くの関連数値の変化を監視する必要があり、演算負荷が増大するという問題がある。

【0008】

本発明は、このような従来の問題点に鑑み、LDPC符号の復号法で使用される固定小数点タイプのデジタル信号処理に関して、反復計算の際にオーバーフローの発生する恐れのある関連数値について、演算負荷を増大させずに効率よくスケーリングを行うことができる復号器等を提供することを目的とする。

40

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の復号器（請求項1）は、LDPC符号よりなる符号化データに対して、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式に基づく誤り訂正復号を行って復号データを得る復号器であって、前記符号化データに行処理演算を行う行処理部と、行処理演算の結果得られたデータに列処理演算を行う列処理部と、前記行処理部における行処理演算で生成される被監視値に基づいて、次の列処理演算に用いる変数をスケーリングするスケーリング処理部とを備えていることを特徴とする。

【0010】

上記復号器によれば、オーバーフローの防止のためのスケーリング処理部が、行処理部

50

における行処理演算で生成される被監視値に基づいて、次の列処理演算に用いる変数のスケールリングを行うので、スケールリングを行うに際して復号処理に用いるすべての変数を監視する必要がなく、演算負荷を増大させずに効率よくスケールリングを行うことができる。

【 0 0 1 1 】

本発明の復号器において、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式としては、例えば前記ミニサム復号法を採用することができ、この場合、前記列処理演算に必要な外部値対数比は、対数尤度比と事前値対数比との和の絶対値の第1最小値と第2最小値を用いて演算されるものとなる。

そして、この場合、第2最小値は常に第1最小値以上の値になるので、前記スケールリング処理部としては、その第2最小値を前記被監視値とする監視部と、この監視部で検出された前記第2最小値が所定値を超えた場合に前記変数をスケールリングするスケールリング部とを有するものを採用すればよい（請求項2）。

10

【 0 0 1 2 】

一方、LDPC符号の復号法において、誤り訂正能力と密接に関連しているのは、寧ろ絶対値の小さい（尤度の小さい）変数である。

このため、仮に第2最小値の大きさのみを基準としてスケールリングを行った場合、それより小さい第1最小値に丸め誤差が生じ、この丸め誤差によって却って誤り訂正能力が低下することが懸念される。

【 0 0 1 3 】

そこで、本発明において、前記スケールリング処理部として、前記第1最小値の最下位ビット値を前記被監視値とする監視部と、この監視部で検出された最下位ビット値がゼロである場合に前記変数をスケールリングするスケールリング部とを有するものを採用してもよい（請求項3）。

20

この場合、変数のスケールリングを例えば「2」で除算する演算に設定すれば、スケールリング処理によって第1最小値に丸め誤差が生じることがなく、スケールリング処理に伴う訂正能力の低下を未然に防止することができる。

【 0 0 1 4 】

また、この場合に、第1最小値と第2最小値の双方の最下位ビット値がいずれもゼロであれば、各最小値はいずれも偶数であり、双方を例えば「2」（2進法での「10」）で除算してスケールリングできるとともに、各最小値の双方を同じ値である「2」で除算しても、復号処理後の一時推定語に影響しない。

30

そこで、前記監視部が、更に前記第2最小値の最下位ビット値を前記被監視値としており、前記スケールリング部が、前記監視部で検出された双方の最下位ビット値がいずれもゼロである場合に前記変数をスケールリングするようにすれば（請求項4）、第1及び第2最小値の双方に丸め誤差が生じることがなく、スケールリング処理に伴う訂正能力の低下をより完全に防止することができる。

【 0 0 1 5 】

本発明の受信装置（請求項5）は、通信路に伝送された符号化データを受信して復号する受信装置であって、受信した前記符号化データをデジタル復調する復調器と、復調された前記符号化データのデジタル信号を復号する前記復号器とを備えていることを特徴とする。

40

また、本発明の復号方法（請求項6）は、LDPC符号よりなる符号化データに対して、サムプロダクト復号法を簡略化した復号方式に基づく誤り訂正復号を行って復号データを得る符号化データの復号方法であって、行処理演算で生成される被監視値に基づいて、次の列処理演算に用いる変数をスケールリングすることを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

上記受信装置及び復号方法によれば、行処理演算で生成される被監視値に基づいて次の列処理演算に用いる変数をスケールリングするので、スケールリングを行うに際して復号処理に用いるすべての変数を監視する必要がない。

このため、演算負荷を増大させずに効率よくスケールリングを行うことができ、オーバー

50

フローによる能力低下を安価に防止することができる。

【発明の効果】

【0017】

以上の通り、本発明によれば、LDPC符号の復号法で使用される固定小数点タイプのデジタル信号処理に関して、反復計算の際にオーバーフローの発生する恐れのある関連数値について、演算負荷を増大させずに効率よくスケール処理を行うことができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0018】

〔通信システム〕

図1は、本発明に従う復号器を用いた通信システムの構成の一例を示す図である。

10

図1に示すように、この通信システムは、符号化データを送信する送信装置Sと、符号化データを受信して復号する受信装置Rとを備えている。

【0019】

上記送信装置Sは、送信情報に誤り訂正用の冗長ビットを付加して送信符号（符号化データ）を生成する符号化器1と、この符号化器1からの $(K+M)$ ビットの符号を所定の方式に従って変調して通信路3へ出力する変調器2とを含む。

符号化器1は、 $K$ ビットの情報に対し、パリティ計算用の冗長ビット $M$ ビットを付加して、 $(K+M)$ ビットのLDPC（低密度パリティ検査）符号を生成する。低密度パリティ検査行列においては、行数が冗長ビット数に対応し、列数が符号ビット数に対応する。ただし、一般的には、各ビット数と行数又は列数とが一致しない場合もある。

20

【0020】

また、 $(K+M)$ ビットのLDPC符号化データのどのビットに、 $K$ 個の情報ビット及び $M$ 個の冗長ビットを配置するかは、送信側と受信側で取り決めていれば、どのように配置してもよい。

変調器2は、この通信路の構成に応じて、振幅変調、位相変調、コード変調、周波数変調又は直交周波数分割多重変調などの変調を行う。

【0021】

例えば、通信路3が光ファイバの場合、変調器2においては、レーザダイオードの輝度を送信情報ビット値に応じて変更させることにより、光の強度変調（一種の振幅変調）を行っている。

30

すなわち、送信データビットが“0”の場合には、“+1”に変換して、レーザダイオードの発光強度を強くして送信し、また送信データビットが“+1”の場合、“-1”に変換して、レーザダイオードの発光強度を弱くして送信する。

【0022】

前記受信装置Rは、通信路3を介して送信された変調信号に復調処理を施して、 $(K+M)$ ビットのデジタル符号を復調する復調器4と、この復調器4からの $(K+M)$ ビットの符号にパリティ検査行列に基づく復号処理を施して元の $K$ ビットの情報を再生する復号器5とを備えている。

復調器4は、この通信路3における送信形態に応じて復調処理を行なう。例えば、振幅変調、位相変調、コード変調、周波数変調および直交周波数分割多重変調等の場合、復調器4において、振幅復調、位相復調、コード復調及び周波数復調等の処理が行われる。

40

【0023】

〔送信データと復調データの対応関係〕

図2は、通信路3が光ファイバの場合の変調器2及び復調器4の出力データの対応関係を一覧にして示す図である。

図2において、上述のように、通信路3が光ファイバの場合、変調器2においては、送信データが“0”のときには、“1”に変換され、送信用のレーザダイオード（発光ダイオード）の発光強度が強くなり、また送信データビットが“1”のときには、“-1”に変換され、レーザダイオードの発光強度を弱くして送信する。

【0024】

50

この通信路 3 における伝送損失等により、復調器 4 に伝達される光強度は、最も強い強度から最も弱い強度までの間のアナログ的な強度分布を有する。復調器 4 においては、この入力された光信号の量子化処理（アナログ/デジタル変換）を行なって、この受光レベルを検出する。

図 2 においては、8 段階に受光レベルが量子化された場合の受信信号強度を示す。すなわち、受光レベルがデータ“7”のときには、発光強度がかなり強く、受光レベルが“0”のときには、光強度がかなり弱い状態である。

#### 【0025】

各受光レベルは符号付きデータに対応づけられ、復調器 4 から出力される。この復調器 4 の出力は、受光レベルが“7”のときにはデータ“3”が出力され、受光レベルが“0”のときには、データ“-4”が出力される。従って、この復調器 4 からは、1 ビットの受信信号に対し、多値量子化された信号が出力される。

10

復号器 5 は、この復調器 4 から与えられた  $(K + M)$  ビットの受信符号化データ（各ビットは、多値情報を含む）の入力を受け、例えば後に詳述するミニサム復号法に従って LDP 奇偶検査行列を適用し、元の  $K$  ビットの情報を復元する。

#### 【0026】

なお、この図 2 においては、復調器 4 において、8 レベルに量子化されたビットが生成されている。しかしながら、一般に、この復調器 4 においては、 $L$  値 ( $L \geq 2$ ) に量子化されたビットを用いて復号処理を行なうことができる。

また、図 2 においては、比較器を用いて、あるしきい値を使って受信信号のレベルを判定し、2 値信号を生成してもよい。

20

#### 【0027】

〔復号器の構成〕

図 3 は、上記復号器 5 の構成を概略的に示す図である。

この図 3 においては、復調器 4 及び通信路 3 も併せて示してある。

復調器 4 は、通信路 3 から与えられた信号を復調する復調回路 4 a と、この復調回路 4 a により生成されたアナログ復調信号をデジタル信号に変換するアナログ/デジタル変換回路 4 b を含み、このアナログ/デジタル変換回路 4 b の出力データ  $X_n$  が復号器 5 へ与えられる。

#### 【0028】

この復号器 5 へ与えられる符号化データ  $X_n$  は  $L$  値 ( $L \geq 2$ ) のデータである。この符号化データ  $X_n$  は多値量子化データであるため、以下においては、当該データ  $X_n$  をシンボルと称することがある。

30

復号器 5 は、この入力シンボル  $X_n$  系列に対してミニサム復号法に従って復号処理を行なって符号ビット  $C_n$  を生成するものであり、復調器 4 からの復調シンボル  $X_n$  の対数尤度比  $\ln$  を生成する対数尤度比算出部 10 と、パリティ検査行列の行処理を行う行処理部 12 と、パリティ検査行列の列処理を行う列処理部 14 と、対数尤度比算出部 10 からの対数尤度比  $\ln$  と行処理部 12 の出力ビット（外部値対数比）  $m_n$  とに従って符号を生成するループ判定部 16 とを備えている。

#### 【0029】

対数尤度比算出部 10 は、上記受信信号のノイズ情報とは独立に、対数尤度比  $\ln$  を生成する。通常、ノイズ情報を考慮した場合には、この対数尤度比  $\ln$  は、 $X_n / (2 \cdot \sigma)$  で与えられる。ここで、 $\sigma$  は、ノイズの分散を示す。

40

しかし、本実施形態においては、この対数尤度比算出部 10 は、バッファ回路または定数乗算回路で形成され、対数尤度比  $\ln$  は、 $X_n \cdot f$  で与えられる。ここで、 $f$  は非ゼロの正の数である。このノイズ情報を利用せずに、対数尤度比を算出することにより、回路構成が簡略化され、また計算処理も簡略化される。

#### 【0030】

なお、ミニサム復号法では、検査行列の処理において最小値を利用して演算するので、信号処理において非ゼロの正の数によるスケージングに関して線形性が維持される。この

50

ため、ノイズ情報に従って出力データを正規化するなどの処理は不要である。

【0031】

〔復号器の演算アルゴリズム〕

行処理部12及び列処理部14は、それぞれ、次の式(1)及び(2)に従って演算処理を行い、パリティ検査行列の行の各要素についての処理(行処理)と、列の各要素についての処理(列処理)を実行する。

また、行処理部12は、列処理部14から与えられる事前値対数比  $\alpha_{mn}$  と対数尤度比  $\beta_{mn}$  によって外部値対数比  $\alpha_{mn}$  を更新する。

【0032】

【数1】

10

[行処理演算]

$$\alpha_{mn} = \underbrace{\left[ \prod_{n' \in A(m) \setminus n} \text{sign}(\lambda_{n'} + \beta_{mn'}) \right]}_{\text{符号決定部分}} \underbrace{\text{Min}_{n' \in A(m) \setminus n} |\lambda_{n'} + \beta_{mn'}|}_{\text{最小値部分}} \dots\dots (1)$$

$\beta_{mn}$ : 初期値は0

[列処理演算]

$$\beta_{mn} = \sum_{n' \in B(n) \setminus m} \alpha_{m'n'} \dots\dots (2)$$

【0033】

上記式(1)及び(2)のそれぞれにおいて、 $n \in A(m) \setminus n$  と  $m \in B(n) \setminus m$  は、自身を除く要素を意味する。外部値対数比  $\alpha_{mn}$  については、 $n \in A(m) \setminus n$  であり、事前値対数比  $\beta_{mn}$  については、 $m \in B(n) \setminus m$  である。

30

また、およびの行列内の位置を示す添え字“mn”は、通常は下付文字で示されるが、本明細書においては、読みやすさのために、「横並びの文字」で示す。

【0034】

上記式(1)中の関数  $\text{sign}(x)$  は、次式(3)で定義される。

【数2】

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \dots\dots (3)$$

【0035】

ここで、関数  $\text{min}$  は、最小値を求める演算子を意味する。

また、集合  $A(m)$  及び  $B(n)$  は、2元  $M \cdot N$  行列  $H = [H_{mn}]$  を復号対象に対するLDPC符号の検査行列とした場合、集合  $[1, N] = \{1, 2, \dots, N\}$  の部分集合である。

$$A(m) = \{n : H_{mn} = 1\} \dots\dots (4)$$

$$B(n) = \{m : H_{mn} = 1\} \dots\dots (5)$$

【0036】

すなわち、部分集合  $A(m)$  は、検査行列  $H$  の第  $m$  行目において1が立っている列インデックスの集合を意味し、部分集合  $B(n)$  は、検査行列  $H$  の第  $n$  列目において1が立っ

50

ている行インデックスの集合を示す。

より具体的に説明するために、例えば図 4 に示す検査行列 H を考える。

この図 4 の検査行列 H においては、第 1 行の第 1 列から第 3 列に“ 1 ”が立ち、また第 2 行の第 3 列および第 4 列に“ 1 ”が立ち、また第 3 行の第 4 列から第 6 列に、“ 1 ”が立つ。従って、この場合、部分集合 A ( m ) は以下のようになる。

【 0 0 3 7 】

$A ( 1 ) = \{ 1 , 2 , 3 \}$

$A ( 2 ) = \{ 3 , 4 \}$

$A ( 3 ) = \{ 4 , 5 , 6 \}$

【 0 0 3 8 】

同様に、部分集合 B ( n ) については、以下のようになる。

$B ( 1 ) = B ( 2 ) = \{ 1 \}$

$B ( 3 ) = \{ 1 , 2 \}$

$B ( 4 ) = \{ 2 , 3 \}$

$B ( 5 ) = B ( 6 ) = \{ 3 \}$

【 0 0 3 9 】

この検査行列 H において、タナー ( Tanner ) グラフを用いた場合、列に対応する変数ノードと行に対応するチェックノードの接続関係が、この“ 1 ”により示される。これを、本明細書においては「“ 1 ”が立つ」と称している。

すなわち、図 5 に示すように、変数ノード 1 , 2 , 3 は、チェックノード X ( 第 1 行 ) に接続され、変数ノード 3 , 4 が、チェックノード Y ( 第 2 行 ) に接続される。変数ノード 4 , 5 , 6 が、チェックノード Z ( 第 3 行 ) に接続される。

【 0 0 4 0 】

この変数ノードが検査行列 H の列に対応し、チェックノード X , Y および Z が、この検査行列 H の各行に対応する。従って、図 4 に示す検査行列は、情報ビットが 3 ビット、冗長ビットが 3 ビットの合計 6 ビットの符号に対して適用される。

L D P C の検査行列 H では、“ 1 ”の数は少なく低密度の検査行列であり、これによって計算量を低減できる。この変数ノードとチェックノードの間で各条件確率  $P ( X_i | Y_i )$  を伝播させ、M A P アルゴリズムに従って、尤もらしい符号を各変数ノードについて決定する。ここで、条件付確率  $P ( X_i | Y_i )$  は、 $Y_i$  の条件下で  $X_i$  となる確率を示す。

【 0 0 4 1 】

〔ループ判定部〕

ループ判定部 1 6 は、上記行処理部 1 2 及び列処理部 1 4 における演算処理の結果に基づいて一時推定語を生成し、これらの一時推定語が符号語を構成しているかを検査する。このパリティ検査時において、シンδροームが“ 0 ”とならない場合には、再び処理を繰返し実行する。この処理の繰返し回数が所定値に到達すると、そのときの一時推定語を符号語として出力する。

【 0 0 4 2 】

本実施形態においては、前述の式 ( 1 ) における最小値関数  $m i n$  の演算処理操作 ( 以下、M i n 演算と称することがある。 ) 時に、すべての入力データ ( シンボル )  $X_n$  の対数尤度比  $n$  と事前値対数比  $m n$  の絶対値の最小値及び次の最小値 ( 以下、これらを第 1 最小値及び第 2 最小値と称する。 ) を記憶し、これらのいずれかを選択することにより、この最小値関数  $m i n$  の演算を実行する。

【 0 0 4 3 】

〔外部値対数比の演算動作の具体例〕

次に、この行処理部 1 2 における外部値対数比  $m n$  の演算をより具体的に説明する。

いま、入力シンボル  $X_n$  の系列として、次式で示される入力シンボル  $X_n$  を考え、パリティ検査行列 ( 以下、単に検査行列と称す ) H としては、図 4 に示す検査行列 H を利用するものとする。

10

20

30

40

50

$$X_n = (3, 1, 2, -1, 1, 2)$$

## 【0044】

検査行列Hの第1行の処理としては、図5に示すチェックノードXにおける処理が実行される。

この場合、図6(a)に示すように、外部値対数比 $1_1$ は、チェックノード2及び3の値である $(2 + 1_2)$ と $(3 + 1_3)$ を用いて絶対値の最小値を検出し、かつこれらのチェックノード2及び3の値の符号を乗算することにより求められる。すなわち、外部値対数比 $1_1$ は、次式で表わされる。

$$1_1 = \text{sign}(2 + 1_2) \cdot \text{sign}(3 + 1_3) \cdot \text{Min}(|2 + 1_2|, |3 + 1_3|) \quad 10$$

## 【0045】

なお、チェックノード4から6については、検査行列Hの対応の要素が“0”であり、この演算処理には利用されない。符号“ $\cdot$ ”は、乗算を示す。

次に、図6(b)に示すように、外部値対数比 $1_2$ は、上記と同様に、チェックノード1及び3の値である $(1 + 1_1)$ と $(3 + 1_3)$ を用いて、次式で求められる。

$$1_2 = \text{sign}(1 + 1_1) \cdot \text{sign}(3 + 1_3) \cdot \text{Min}(|1 + 1_1|, |3 + 1_3|) \quad 20$$

## 【0046】

また、図6(c)に示すように、外部値対数比 $1_3$ についても、上記と同様に、チェックノード1及び2の値である $(1 + 1_1)$ と $(2 + 1_2)$ を用いて、次式で求められる。

$$1_3 = \text{sign}(1 + 1_1) \cdot \text{sign}(2 + 1_2) \cdot \text{Min}(|1 + 1_1|, |2 + 1_2|)$$

## 【0047】

前記した通り、ミニサム復号法を用いる本実施形態では、第1行の演算操作は、図6(a)～図6(c)に示すように、対応の行内において自身を除く最も絶対値の小さな要素を算出し、かつそれらの符号を乗算する。

従って、処理単位内のシンボルにおいて、絶対値が最も小さいシンボル、すなわち最も尤度の低い情報(正確さについての信頼性に関連する情報、すなわち確率情報に対応)を求めて、外部値対数比を求める。

## 【0048】

換言すると、パリティ検査行列を利用する場合、“1”が存在するビット位置のシンボルは、通信路3における信頼性に関する情報を有していることから、信頼性の最も低い(尤度の最も低い)、すなわち絶対値の最も小さい、誤っている可能性の最も高いシンボルを検出し、その及ぼす影響が最も大きいと考えて、それを利用して絶対値を求める。これがMin演算の具体的な処理内容である。

## 【0049】

この外部値対数比 $m_n$ の符号は、処理単位内の信号系列の影響を及ぼす誤りのある可能性の高い符号に対する符号を全て乗算することによって推定される。すなわち、最も信頼性の低い状態から処理を開始し、この処理を繰返し実行することにより、最も信頼性の高い符号値に到達する。この処理操作が、ミニサム復号法におけるMin演算処理の内容である。

## 【0050】

例えば、図2に示す復調器の出力において、送信符号ビットが“1”または“0”の時には、出力値は、“3”または“-4”となる。

しかしながら、通信路における伝送損失などの影響により、値が“0”または“-1”

となると、それらの絶対値が小さくなっており、誤りの発生している可能性が高い。このような絶対値の小さな、不確実な受信信号を用いて元の符号を復元する。

以下の説明においては、この絶対値の最も小さな信号を、エラーの発生確率が高いため、尤度が最も低い信号と称す。

#### 【 0 0 5 1 】

これらの求められた外部値対数比  $m_n$  は、図 3 に示す列処理部 1 4 及びループ判定部 1 6 へ供給される。この列処理部 1 4 は、先の式 ( 2 ) において示された演算処理を行い、検査行列  $H$  の各行において生成された外部値対数比  $m_n$  を用いて、自身を除く行以外の対応の列の “ 1 ” が立っている位置の外部値対数比  $m_n$  を加算する。

#### 【 0 0 5 2 】

〔ループ判定部の処理内容〕

ループ判定部 1 6 は、この行処理部 1 2 で生成される外部値対数比  $m_n$  と対数尤度比算出部 1 0 からの対数尤度比  $n$  とを用いて、複数の符号で構成される符号語を生成する。

図 7 は、このループ判定部 1 6 の処理内容を示すフローチャートである。以下、この図 7 を参照して、ループ判定部 1 6 が行う処理内容を説明する。

#### 【 0 0 5 3 】

まず、初期動作として、ループ回数及び事前値対数比  $m_n$  の初期設定が行われる。

このループ回数は、列処理部 1 4 で生成された事前値対数比  $m_n$  を用いて再び行処理部 1 2 で外部値対数比  $m_n$  を生成するループにおける演算回数を示す。このループ回数においては、最大値が予め定められており、事前値対数比  $m_n$  は、“ 0 ” に初期設定される (ステップ S P 1 )。

#### 【 0 0 5 4 】

次いで、受信シンボル系列に従って、対数尤度比算出部 1 0 及び行処理部 1 2 で生成された対数尤度比  $n$  と外部値対数比  $m_n$  が、ループ判定部 1 6 に供給される (ステップ S P 2 )。

ループ判定部 1 6 は、これらの供給された対数尤度比  $n$  と外部値対数比  $m_n$  に従って、演算  $Q_n = n + m_n$  を行って推定受信語  $Q_n$  を算出する (ステップ S P 3 )。ここで、総和  $\sum$  は、部分集合  $B(n)$  の要素  $m$  について実行される。

#### 【 0 0 5 5 】

また、ループ判定部 1 6 は、ステップ S P 3 において算出された値  $Q_n$  の正負の符号を判定し (ステップ S P 4 )、一時推定符号  $C_n$  を生成する (ステップ S P 5 )。この符号の正 / 負判定においては、例えば、推定受信語  $Q_n$  が 2 の補数表示されているときには、最上位ビット (符号ビット) のビット値を見ることにより、正又は負の判定を行うことができる。

ループ判定部 1 6 は、推定符号  $C_n$  が全て生成され、符号語 (  $C_1, C_2, \dots, C_N$  ) が生成されると、次いでパリティ検査を実行する (ステップ S P 6 )。

#### 【 0 0 5 6 】

このパリティ検査においては、先の検査行列  $H$  の転置行列を用いて、(  $C_1, C_2, \dots, C_N$  )  $\cdot H^t = 0$  を計算する。この計算により、生成されるシンδροームが 0 であれば、一時推定語 (  $C_1, C_2, \dots, C_N$  ) を推定語として出力する (ステップ S P 9 )。

一方、この生成されたシンδροームが 0 と異なる場合には、ループ回数が最大値であるかの判定が行われる (ステップ S P 7 )。

#### 【 0 0 5 7 】

すなわち、この一時推定語の生成回数をカウントし、その生成回数が所定の最大回数に到達すると、その符号についての算出をそれ以上はやめて、現在生成されている一時推定語を符号語として出力する (ステップ S P 9 )。これにより、収束性の悪いノイジーな符号に対して、不必要に演算処理時間をかけるのを防止するようにしている。

ステップ S P 7 において、ループ回数が最大値に到達していないと判定されると、このループ回数を 1 インクリメントし、再び、行処理部 1 2 及び列処理部 1 4 における処理を

10

20

30

40

50

開始させ、ステップ S P 2 からの処理を再度実行する。

上記した一連の処理が、いわゆる L D P C 符号の復号法の処理動作である。

#### 【 0 0 5 8 】

〔スケーリング処理の基本的考え方〕

ところで、L D P C 符号の復号法を簡略化したミニサム復号法の場合、 $|n' + m n'|$  の第 1 最小値又は第 2 最小値のみが行処理部 1 2 において使用されるため、それ以外の大きな値に対しては復号処理に全く反映されないという特徴がある。

また、ミニサム復号法の場合、行処理部 1 2 が行う演算(式(1))に最小値関数( $\text{Min} |n' + m n'|$ )が含まれているので、図 8 に示すように、復号処理に関係するすべての関連数値( , , 等)を任意の正の整数値で除算又は乗算しても、一時推定語の推定結果には全く影響を与えない。

10

#### 【 0 0 5 9 】

そこで、オーバーフローの監視点を、行処理部 1 2 における値が大きい方の第 2 最小値におけば、効率よくオーバーフローの監視を行うことができる。

例えば、入力シンボル X n の符号長が 2 3 0 4 ビット(冗長ビット 1 1 5 2 ビット)であると、検査行列 H の行重みが 6 でかつ列重みが 3 であるとした場合、通常、復号処理に必要な外部値対数比 と事前値対数比 の使用個数は、いずれも、 $2 3 0 4 \times 3 = 6 9 1 2$  個となり、この場合、これらの全個数の値を監視せねばならない。

#### 【 0 0 6 0 】

これに対して、対数尤度比 と事前値対数比 との和の絶対値の第 2 最小値のみを監視する場合には、1 1 5 2 個を監視すれば十分であり、監視する変数の数が 1 / 6 に削減することができる。

20

一方、前記した通り、復号法にとって大切なのは絶対値の大きな値ではなく、絶対値の小さい値が誤り訂正能力と密接に関係している。このため、オーバーフロー防止のためのスケーリングによって出来るだけ数値の丸め誤差が増大しないようにするために、少なくとも第 1 最小値を監視する方式が推奨され、より望ましくは第 1 及び第 2 最小値の双方を監視する方式が推奨される。

#### 【 0 0 6 1 】

この場合、スケーリング処理が「2」での除算であると仮定すると、事前値対数比 の絶対値の第 1 及び第 2 最小値(合計で  $1 1 5 2 \times 2$  個)を監視するに当たって、これらの最下位ビット(L S B)値のみを監視する方式を用いることができる。

30

例えば、この方式を採用した場合、1 個の変数当たり 8 ビットの桁数があると仮定すると、通常では、 $1 1 5 2 \times 2$  個の変数を監視するのに、 $1 1 5 2 \times 2 \times 8$  ビット分の信号線を監視に対応して設ける必要があるが、 $1 1 5 2 \times 2$  個の変数の L S B だけを監視にすれば、 $1 1 5 2 \times 2$  ビット分の信号線を監視に対応して設ければよく、監視する信号線の数を 1 / 8 に削減することが可能となる。

#### 【 0 0 6 2 】

〔スケーリング機能を有する行処理部〕

図 9 は、ミニサム復号法において上記スケーリング機能を有する行処理部 1 2 の一例を示すブロック図である。

40

図 9 に示すように、この行処理部 1 2 は、符号処理部 2 0 と、最小値探索部 2 1 と、符号乗算部 2 2 と、監視部 2 3 と、判定部 2 4 と、スケーリング部 2 5 とを備えている。

かかる行処理部 1 2 の構成要素のうち、符号処理部 2 0 は、前記式(1)に示す行処理演算における符号決定部分の演算を行う演算回路よりなり、最小値探索部 2 1 は、同行処理演算における最小値部分の演算を行う演算回路よりなる。

#### 【 0 0 6 3 】

上記最小値探索部 2 1 は、すべての行に関して、対数尤度比  $n$  と事前値対数比  $m n$  との和の絶対値の第 1 最小値と第 2 最小値とを探索する。この最小値探索部 2 1 における探索アルゴリズムとしては、例えば、トーナメント方式や分布数えソート方式を採用することができる(前記非特許文献 3 参照)。

50

符号乗算部 2 2 は、符号処理部 2 0 で得られた正負いずれかの符号 ( sign ) と、最小値探索部 2 1 で得られた最小値とを乗算する演算回路よりなり、この乗算によって前記式 ( 1 ) に示す行処理演算が完結する。

【 0 0 6 4 】

上記監視部 2 3、判定部 2 4 及びスケール部 2 5 は、行処理部 1 2 における行処理演算で生成される被監視値 ( + の絶対値の第 2 最小値等 ) に基づいて、次の列処理演算に用いる変数 (  $m_n$  ) を任意数で除算するスケール部 2 6 を構成している。

かかるスケール部 2 6 の構成要素のうち、監視部 2 3 は、最小値探索部 2 1 と符号乗算部 2 0 の間に配置されており、最小値探索部 2 1 で探索された対数尤度比  $n$  と事前値対数比  $m_n$  との和の絶対値の第 1 最小値と第 2 最小値が当該監視部 2 3 に入力される。

10

【 0 0 6 5 】

監視部 2 3 は、最小値探索部 2 1 からの入力信号を選択して符号乗算部 2 2 や判定部 2 4 へ出力する、例えばマルチプレクサより構成されている。

このマルチプレクサは、符号乗算部 2 2 に対しては、最小値探索部 2 1 からの入力信号である第 1 最小値と第 2 最小値の双方をそのまま出力するとともに、判定部 2 4 に対しては、当該判定部 2 4 でのオーバーフロー判定に必要な被監視値  $S_1$  を出力する。

本実施形態では、かかる被監視値  $S_1$  として、後述する判定基準 1 のための「第 2 最小値」と、判定基準 2 のための「第 1 及び第 2 最小値の最下位ビット値」が採用される。

【 0 0 6 6 】

判定部 2 4 は、監視部 2 3 からの入力情報である、第 2 最小値と、第 1 及び第 2 最小値の最下位ビット値に基づいてスケール部 2 5 を行うか否かを判定する判定回路よりなり、この判定回路で生成された判定信号  $S_2$  がスケール部 2 5 へ出力される。

そして、スケール部 2 5 は、判定部 2 4 からの判定信号  $S_2$  に基づいてスケール部 2 5 を実施する。具体的には、判定部 2 4 からの判定信号  $S_2$  がスケール部 2 5 の場合、後段の列処理演算に用いる変数である、外部値対数比  $m_n$  を「 2 」で除算し、同判定信号  $S_2$  がスケール部 2 5 不要の場合にはその除算を行わない。

20

【 0 0 6 7 】

本実施形態では、上記判定部 2 4 における具体的な判定基準として、例えば次の基準を採用している。

30

1) 判定基準 1 ... 第 2 最小値を用いる判定

この判定基準 1 では、対数尤度比  $n$  と事前値対数比  $m_n$  との和の絶対値の第 2 最小値を所定の閾値と比較する。第 2 最小値がその閾値よりも大きい場合に、判定信号  $S_2$  をスケール部 2 5 とする。

2) 判定基準 2 ... 第 1 及び第 2 最小値の最下位ビットを用いる判定

この判定基準 2 では、第 1 及び第 2 最小値の最下位ビット値に関して、これらがすべて「 0 」である場合に、判定信号  $S_2$  をスケール部 2 5 とする。

【 0 0 6 8 】

このように、本実施形態の復号器 5 によれば、復号処理を行う場合の固定小数点タイプのデジタル信号処理に関して、オーバーフローを防止するためのスケール部 2 6 が、行処理部 1 2 における行処理演算で生成される被監視値  $S_1$  ( 第 2 最小値等 ) に基づいて、次の列処理演算に用いる変数  $m_n$  をスケール部 2 5 するようにしたので、復号処理に用いるすべての変数  $m_n$ 、 $m_n$ 、 $n$  を監視する必要がなくなり、演算負荷を増大させずに効率よくスケール部 2 5 を行うことができる。

40

【 0 0 6 9 】

ところで、上記の 2 つの判定基準 1 及び 2 のうち、判定基準 1 は、ミニサム復号法においては、対数尤度比  $n$  と事前値対数比  $m_n$  との和の絶対値の第 1 及び第 2 最小値だけで行処理演算が行われることに着目し、その各最小値で値が大きい方の第 2 最小値でスケール部 2 5 の要否を判定するようにしたものである。

【 0 0 7 0 】

50

一方、判定基準 2 は、更に第 1 最小値に対する丸め誤差が生じるのを防止することための基準である。

すなわち、LDPC 符号の復号法において、誤り訂正能力と密接に関連しているのは、寧ろ絶対値の小さい（尤度の小さい）変数であるから、仮に第 2 最小値の大小のみを基準としてスケーリングを行った場合、それより小さい第 1 最小値に丸め誤差が生じ、この誤差によって却って誤り訂正能力が低下する。

#### 【0071】

しかし、第 1 最小値と第 2 最小値の最下位ビット値がいずれもゼロである場合には、各最小値はいずれも偶数であり、双方を「2」（2 進法での「10」）で除算でき、各最小値の双方を「2」で除算しても、復号処理後の一時推定語に影響しない。従って、この場合、第 1 及び第 2 最小値の双方に丸め誤差が生じることがなく、スケーリング処理に伴う訂正能力の低下を完全に防止することができる。

#### 【0072】

もっとも、誤り訂正能力に対して最も影響が大きいのは第 1 最小値であるから、第 1 最小値の最下位ビット値がゼロであれば、第 2 最小値の最下位ビット値とは無関係に、「2」で除算するスケーリングを行うようにしてもよい。

なお、本実施形態において、判定基準 1 及び 2 のうち、いずれか一方のみを採用することにしてもよい。また、スケーリング部 25 における演算は、列処理部 14 で使用するに必要なビット数を減少させる演算であればよく、「2」で除算する演算に限るものではない。例えば、「2」で除算する演算の代わりに、これと等価の演算である例えば  $1/2$  の乗算であってもよいし、2 の n 乗数で除算するものであってもよい。

#### 【0073】

これまで開示した実施形態はすべて例示であって制限的なものではない。本発明の範囲は特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲の構成と均等の範囲内のすべての変更が本発明に含まれる。

例えば、上記実施形態では、本発明をミニサム復号法に採用した場合を例示したが、本発明は、サムプロダクト復号法を簡略化した他の復号方式、例えば、Normalized-BP、Offset-BP、 $\gamma$ -Min、FUMP-APP（非特許文献 3）などの復号方式にも採用することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0074】

【図 1】本発明の復号器を用いた通信システムの一例を示す概略構成図である。

【図 2】送信データと復調データの対応関係の一例を示す図である。

【図 3】本発明の復号器の一例を示す概略構成図である。

【図 4】検査行列の一例を示す図である。

【図 5】図 4 に示す検査行列のタナーグラフである。

【図 6】(a) ~ (c) は行処理部の処理内容の一例を示す図である。

【図 7】ループ判定部の処理内容を示すフローチャートである。

【図 8】復号処理で用いる各変数に定数を除算又は乗算した場合の、一時推定語に与える影響を示す図である。

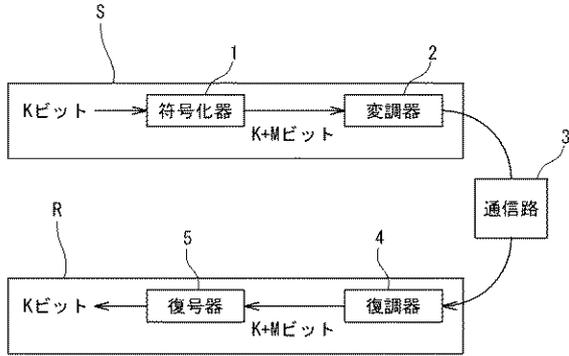
【図 9】スケーリング機能を有する行処理部の構成例を示すブロック図である。

#### 【符号の説明】

#### 【0075】

1 : 符号化器      2 : 変調器      3 : 通信路      4 : 復調器  
 4 a : 復調回路      4 b : A / D 変換回路      5 : 復号器  
 10 : 対数尤度比算出部      12 : 行処理部      14 : 列処理部      16 : ループ判定部  
 20 : 符号処理部      21 : 最小値探索部      22 : 符号乗算部      23 : 監視部  
 24 : 判定部      25 : スケーリング部      26 : スケーリング処理部  
 S : 送信装置      R : 受信装置      X n : 符号化データ      C n : 復号データ  
 n : 対数尤度比      m n : 外部値対数比      m n : 事前値対数比

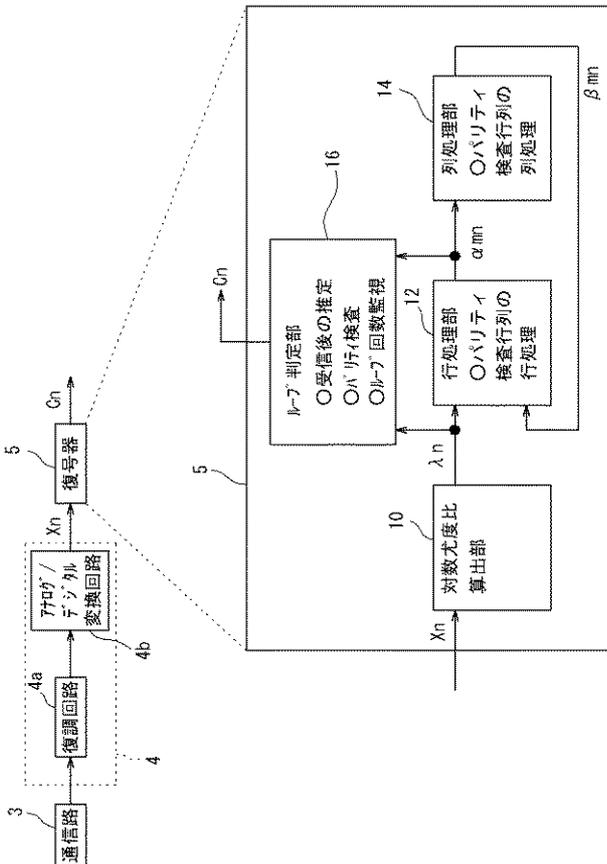
【図1】



【図2】

送信データ	変調器出力	輝度変調	受光レベル	復調器出力
0	1	強く光る	7: かなり強い光	3
			6: 少し強い光	2
			5: 強い光	1
			4: 普通の光	0
1	-1	弱い光	3: 普通よりちょっとだけ弱い光	-1
			2: 弱い光	-2
			1: 少し弱い光	-3
			0: かなり弱い光	-4

【図3】



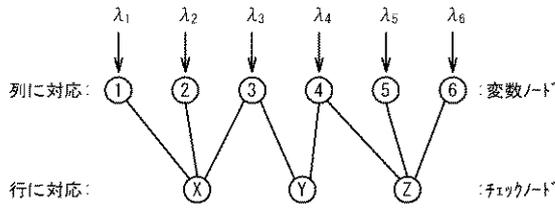
【図4】

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

A(1)
A(2)
A(3)

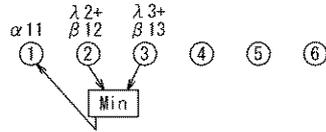
B(4)

【 図 5 】

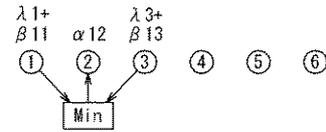


【 図 6 】

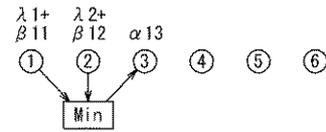
(a)  $\alpha_{11} = \text{sign}(\lambda_2 + \beta_{12}) * \text{sign}(\lambda_3 + \beta_{13}) * \text{Min}(|\lambda_2 + \beta_{12}|, |\lambda_3 + \beta_{13}|)$



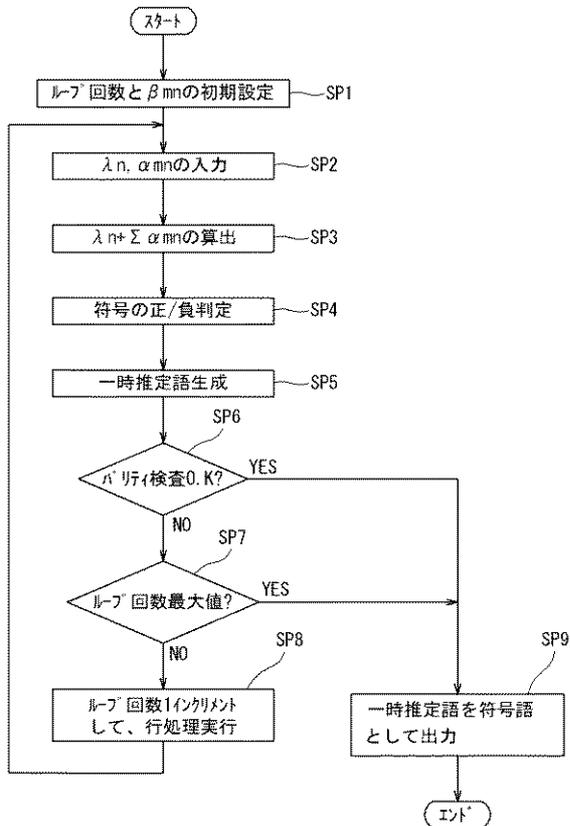
(b)  $\alpha_{12} = \text{sign}(\lambda_1 + \beta_{11}) * \text{sign}(\lambda_3 + \beta_{13}) * \text{Min}(|\lambda_1 + \beta_{11}|, |\lambda_3 + \beta_{13}|)$



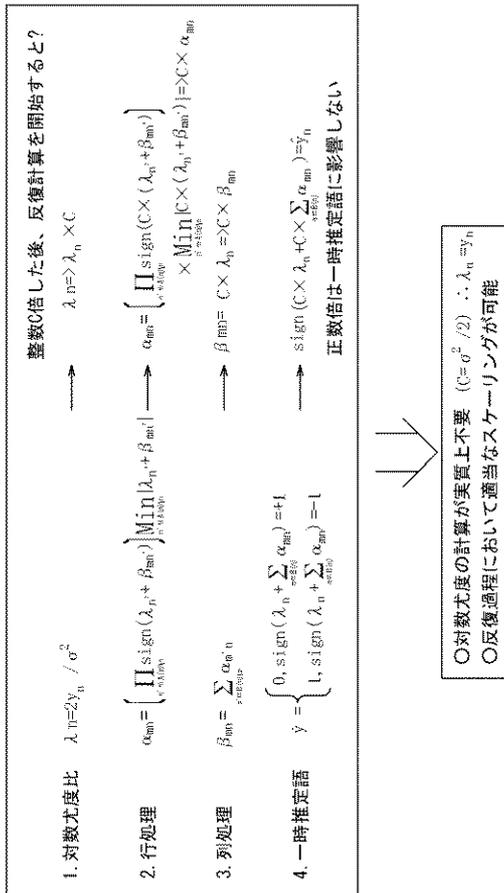
(c)  $\alpha_{13} = \text{sign}(\lambda_1 + \beta_{11}) * \text{sign}(\lambda_2 + \beta_{12}) * \text{Min}(|\lambda_1 + \beta_{11}|, |\lambda_2 + \beta_{12}|)$



【 図 7 】



【 図 8 】



【図9】

