

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4399573号
(P4399573)

(45) 発行日 平成22年1月20日 (2010.1.20)

(24) 登録日 平成21年11月6日 (2009.11.6)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 S 3/46 (2006.01) GO 1 S 3/46

請求項の数 4 (全 17 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2004-60922 (P2004-60922)</p> <p>(22) 出願日 平成16年3月4日 (2004.3.4)</p> <p>(65) 公開番号 特開2005-249604 (P2005-249604A)</p> <p>(43) 公開日 平成17年9月15日 (2005.9.15)</p> <p>審査請求日 平成18年10月17日 (2006.10.17)</p> <p>(出願人による申告) 平成15年度通信・放送機構、研究テーマ「自律分散型無線ネットワークの研究開発」に関する委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受ける特許出願</p> <p>特許権者において、実施許諾の用意がある。</p>	<p>(73) 特許権者 393031586 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2</p> <p>(74) 代理人 100112715 弁理士 松山 隆夫</p> <p>(72) 発明者 山田 寛喜 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内</p> <p>(72) 発明者 平田 明史 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内</p> <p>(72) 発明者 大平 孝 京都府相楽郡精華町光台二丁目2番地2 株式会社国際電気通信基礎技術研究所内</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
---	---

(54) 【発明の名称】 到来方向推定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定平面内における方位角と前記所定平面と成す角度である仰角とからなる方向から到来する複数のコヒーレント波の到来方向を推定する到来方向推定装置であって、

1本の給電素子とN-1(Nは9以上の奇数)本の無給電素子とからなるN本のアンテナ素子を含み、前記N本のアンテナ素子が前記給電素子を中心にして前記所定平面に2次元矩形対称に配置されたアレーアンテナと、

前記N-1本の無給電素子に装荷された可変容量素子の少なくとも1つの容量を変え、前記アレーアンテナの指向性を切替える指向性切替手段と、

前記指向性切替手段により前記アレーアンテナの指向性がN個に切替えられたときに前記アレーアンテナによって受信された受信信号に基づいて前記複数のコヒーレント波間の相関を示す相関行列を空間平均法を用いて演算し、その演算した相関行列に固有値分解を施して前記複数のコヒーレント波の到来方向を推定する方向推定手段とを備え、

前記方向推定手段は、各々がn(nは、 $n < N$ を満たす自然数)本のアンテナ素子からなり、かつ、相互に平行移動可能な2つのサブアレーに前記N本のアンテナ素子を分割し、その分割した各サブアレーにおける前記複数のコヒーレント波間の相関を示す部分相関行列を前記2つのサブアレーについて演算し、さらに、前記演算した2つの部分相関行列に空間平均を施して前記相関行列を演算する、到来方向推定装置。

【請求項2】

所定平面内における方位角と前記所定平面と成す角度である仰角とからなる方向から到

10

20

来する複数のコヒーレント波の到来方向を推定する到来方向推定装置であって、

1本の給電素子と $N - 1$ (N は9以上の奇数)本の無給電素子とからなる N 本のアンテナ素子を含み、前記 N 本のアンテナ素子が前記給電素子を中心にして前記所定平面に2次元矩形対称に配置されたアレーアンテナと、

前記 $N - 1$ 本の無給電素子に装荷された可変容量素子の少なくとも1つの容量を変え、前記アレーアンテナの指向性を切換える指向性切換手段と、

前記指向性切換手段により前記アレーアンテナの指向性が N 個に切換えられたときに前記アレーアンテナによって受信された受信信号に基づいて前記複数のコヒーレント波間の相関を示す相関行列を空間平均法を用いて演算し、その演算した相関行列に固有値分解を施して前記複数のコヒーレント波の到来方向を推定する方向推定手段とを備え、

10

前記方向推定手段は、各々が前記給電素子を含む k (k は、 $k < N$ を満たす自然数)本のアンテナ素子からなり、かつ、相互に平行移動可能な m (m は、 $m < N$ を満たす自然数)個のサブアレーに前記 N 本のアンテナ素子を分割し、その分割した各サブアレーにおける前記複数のコヒーレント波間の相関を示す部分相関行列を前記 m 個のサブアレーについて演算し、さらに、前記演算した m 個の部分相関行列に空間平均を施して前記相関行列を演算する、到来方向推定装置。

【請求項3】

前記方向推定手段は、前記分割された1つのサブアレーを1つの方向へ平行移動して空間平均を行なう順方向空間平均法によって前記2つの部分相関行列または前記 m 個の部分相関行列に空間平均を施す、請求項1または請求項2に記載の到来方向推定装置。

20

【請求項4】

前記方向推定手段は、前記分割された1つのサブアレーを1つの方向へ平行移動して空間平均を行なう順方向空間平均法と、前記分割された1つのサブアレーを前記1つの方向と反対方向へ平行移動して空間平均を行なう逆方向空間平均法とによって前記2つの部分相関行列または前記 m 個の部分相関行列に空間平均を施す、請求項1または請求項2に記載の到来方向推定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、コヒーレント波の到来方向を推定する到来方向推定装置に関するものである。

30

【背景技術】

【0002】

非特許文献1は、電氣的に指向性を切換可能なアレーアンテナを用いて3個のコヒーレント波の到来方向を推定する到来方向推定方法を開示する。アレーアンテナは、1本の給電素子と、6本の無給電素子とからなり、6本の無給電素子は、給電素子の回りに円形配列される。より具体的には、6本の無給電素子は、給電素子を中心にして正六角形に配置される。また、6本の無給電素子には、可変容量素子であるバラクタダイオードが装荷されており、バラクタダイオードの容量を変えることによってアレーアンテナの指向性が切換えられる。

40

【0003】

非特許文献1に開示された到来方向推定方法は、空間平均法 (SSP: Spatial Smoothing Preprocessing) と、MUSIC法 (Multiple Signal Classification) とを組み合わせた方法である。

【0004】

すなわち、この到来方向推定方法は、指向性を切換えながらアレーアンテナによって受信された受信信号に基づいて、到来する複数のコヒーレント波間の相関を示す相関行列を空間平均法を施して演算し、その演算した相関行列に固有値分解を施して到来方向を推定する。

【0005】

50

具体的には、次の方法によって相関行列が演算される。

【0006】

アレーアンテナの1本の給電素子と正六角形に配置された6本の無給電素子とからなる7本のアンテナ素子を平行移動可能な菱形からなる複数のサブアレーに分割する。アレーアンテナの1本の給電素子と正六角形に配置された6本の無給電素子とからなる7本のアンテナ素子においては、平行移動可能な菱形のサブアレーは、3対(3つの方向の各々において2個)形成される。

【0007】

そして、各方向において菱形のサブアレーを順方向に平行移動したときの順方向部分相関行列と、菱形のサブアレーを逆方向に平行移動したときの逆方向部分相関行列とを演算し、さらに、順方向部分相関行列と逆方向部分相関行列との平均を演算して各方向における部分相関行列を演算する。その結果、3つの方向に対して3つの部分相関行列が演算される。

10

【0008】

その後、3つの部分相関行列の各々に対して固有値分解を施して3つのMUSICスペクトラムを演算し、その演算した3つのMUSICスペクトラムに平均化処理を施して3つのMUSICスペクトラムを合成する。そして、この合成したMUSICスペクトラムから到来方向を推定する。その結果、7本のアンテナ素子を用いた場合、2個の到来方向が推定可能である。

【非特許文献1】平田 明史、タコフェールエディ、青野 智之、山田 寛喜、大平 孝、「エスパアンテナを用いたリアクタンズドメインMUSIC法によるコヒーレント2波の到来方向推定実験」, 信学技報, AP2003-24, pp. 59-64, May 2003.

20

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかし、非特許文献1に記載された到来方向推定方法では、3つの方向の各々において順方向および逆方向空間平均法を用いて3つの部分相関行列を演算し、その演算した3つの部分相関行列の各々に固有値分解を施して3つのMUSICスペクトラムを演算し、さらに、3つのMUSICスペクトラムを平均化処理によって合成するため、演算が複雑になるという問題がある。

30

【0010】

そこで、この発明は、かかる問題を解決するためになされたものであり、その目的は、簡単な演算によりコヒーレント波の到来方向を推定可能な到来方向推定装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

この発明によれば、到来方向推定装置は、所定平面内における方位角と所定平面と成す角度である仰角とからなる方向から到来する複数のコヒーレント波の到来方向を推定する到来方向推定装置であって、アレーアンテナと、指向性切換手段と、方向推定手段とを備える。アレーアンテナは、1本の給電素子と $N-1$ (N は9以上の奇数)本の無給電素子とからなる N 本のアンテナ素子を含む。そして、 N 本のアンテナ素子が給電素子を中心にして所定平面に2次元矩形対称に配置される。指向性切換手段は、 $N-1$ 本の無給電素子に装荷された可変容量素子の少なくとも1つの容量を変え、アレーアンテナの指向性を切換える。方向推定手段は、指向性切換手段によりアレーアンテナの指向性が N 個に切換えられたときにアレーアンテナによって受信された受信信号に基づいて複数のコヒーレント波間の相関を示す相関行列を空間平均法を用いて演算し、その演算した相関行列に固有値分解を施して複数のコヒーレント波の到来方向を推定する。

40

【0012】

好ましくは、方向推定手段は、各々が n (n は、 $n < N$ を満たす自然数)本のアンテナ

50

素子からなり、かつ、相互に平行移動可能な2つのサブアレーにN本のアンテナ素子を分割し、その分割した各サブアレーにおける前記複数のコヒーレント波間の相関を示す部分相関行列を2つのサブアレーについて演算し、さらに、演算した2つの部分相関行列に空間平均を施して相関行列を演算する。

【0013】

好ましくは、方向推定手段は、各々が給電素子を含む k (k は、 $k < N$ を満たす自然数)本のアンテナ素子からなり、かつ、相互に平行移動可能な m (m は、 $m < N$ を満たす自然数)個のサブアレーにN本のアンテナ素子を分割し、その分割した各サブアレーにおける複数のコヒーレント波間の相関を示す部分相関行列を m 個のサブアレーについて演算し、さらに、演算した m 個の部分相関行列に空間平均を施して相関行列を演算する。

10

【0014】

好ましくは、方向推定手段は、分割された1つのサブアレーを1つの方向へ平行移動して空間平均を行なう順方向空間平均法によって2つの部分相関行列または m 個の部分相関行列に空間平均を施す。

【0015】

好ましくは、方向推定手段は、分割された1つのサブアレーを1つの方向へ平行移動して空間平均を行なう順方向空間平均法と、分割された1つのサブアレーを1つの方向と反対方向へ平行移動して空間平均を行なう逆方向空間平均法とによって2つの部分相関行列または m 個の部分相関行列に空間平均を施す。

【発明の効果】

20

【0016】

この発明による到来方向推定装置において、方向推定手段は、指向性を複数に切替えたときにアレーアンテナによって受信された複数の受信信号を要素とする受信信号ベクトルに基づいて、複数のコヒーレント波間の相関を示す相関行列を空間平均法を適用して演算する。そして、方向推定手段は、その演算した相関行列に固有値分解を施してコヒーレント波の到来方向を推定する。

【0017】

したがって、この発明によれば、1本の素子を中心にして6本の素子が円形配列された7本の素子からなるアレーアンテナを用いた場合に比べ、演算を簡単できる。

【0018】

30

また、N本のアンテナ素子は、2次元矩形対称に配置されるので、平行移動可能なサブアレーを構成するアンテナ素子数を増加させることができ、その結果、推定可能な到来方向の数を増加させることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

本発明の実施の形態について図面を参照しながら詳細に説明する。なお、図中同一または相当部分には同一符号を付してその説明は繰返さない。

【0020】

図1は、この発明の実施の形態による到来方向推定装置の概略図である。図1を参照して、この発明の実施の形態による到来方向推定装置100は、アレーアンテナ10と、指向性切替手段20と、方向推定手段30とを備える。

40

【0021】

アレーアンテナ10は、アンテナ素子1~9と、バラクタダイオード11~18とを含む。アンテナ素子1~9は、 x 軸、 y 軸および z 軸からなる $x y z$ 直交座標における z 軸に沿って $x - y$ 平面(所定平面)に配置される。

【0022】

図2は、図1に示す $x - y$ 平面におけるアンテナ素子1~9の平面配置図である。図2を参照して、アンテナ素子1~9は、アンテナ素子5を中心にして正方形に配置される。すなわち、アンテナ素子1~9は、アンテナ素子5を中心にして2次元矩形対称に配置される。

50

【 0 0 2 3 】

再び、図 1 を参照して、アンテナ素子 5 は、給電素子であり、アンテナ素子 1 ~ 4 , 6 ~ 9 は、無給電素子である。バラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 は、それぞれ、アンテナ素子 1 ~ 4 , 6 ~ 9 と接地ノードとの間に接続される。これによって、無給電素子であるアンテナ素子 1 ~ 4 , 6 ~ 9 には、可変容量素子であるバラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 が装荷される。

【 0 0 2 4 】

このように、アレーアンテナ 1 0 は、1 本の給電素子 (アンテナ素子 5) と、8 本の無給電素子 (アンテナ素子 1 ~ 4 , 6 ~ 9) とからなる 9 本のアンテナ素子が給電素子を中心にして 2 次元矩形対称に配置された構造からなる。

10

【 0 0 2 5 】

指向性切換手段 2 0 は、バラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 にそれぞれ制御電圧セット $C V L 1 \sim C V L 8$ を供給し、アレーアンテナ 1 0 の指向性を切換える。バラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 は、それぞれ、制御電圧 $C V L 1 \sim C V L 8$ によって容量 (リアクタンス値) が変化する。指向性切換手段 2 0 は、各バラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 におけるリアクタンス値が “ h i ” (最大値) または “ l o ” (最小値) になるように各制御電圧 $C V L 1 \sim C V L 8$ の電圧値を決定し、制御電圧セット $C V L 1 \sim C V L 8$ をバラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 へ供給する。

【 0 0 2 6 】

この場合、指向性切換手段 2 0 は、バラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 におけるリアクタンス値 $x_{m1} \sim x_{m8}$ のセット x_m が表 1 に示すように変化するように制御電圧セット $C V L 1 \sim C V L 8$ をバラクタダイオード 1 1 ~ 1 8 へ供給する。

20

【 0 0 2 7 】

【 表 1 】

m	ビームパターン	xm1	xm2	xm3	xm4	xm5	xm6	xm7	xm8
0	オムニパターン	hi	hi	hi	hi	hi	hi	hi	hi
1	0 度方向	lo	hi	hi	hi	hi	hi	hi	hi
2	45 度方向	hi	lo	hi	hi	hi	hi	hi	hi
3	90 度方向	hi	hi	lo	hi	hi	hi	hi	hi
4	135 度方向	hi	hi	hi	lo	hi	hi	hi	hi
5	180 度方向	hi	hi	hi	hi	lo	hi	hi	hi
6	225 度方向	hi	hi	hi	hi	hi	lo	hi	hi
7	270 度方向	hi	hi	hi	hi	hi	hi	lo	hi
8	315 度方向	hi	hi	hi	hi	hi	hi	hi	lo

30

【 0 0 2 8 】

リアクタンス値 $x_{m1} \sim x_{m8}$ の全てが “ h i ” であるとき ($m = 0$)、アレーアンテナ 1 0 は、全方位に感度があるオムニパターンに近いパターンからなるビームパターン B P M 0 を有する。また、リアクタンス値 x_{m1} が “ l o ” であり、リアクタンス値 $x_{m2} \sim x_{m8}$ が “ h i ” であるとき ($m = 1$)、アレーアンテナ 1 0 は、0 度の方向に指向性があるビームパターン B P M 1 を有する。

40

【 0 0 2 9 】

さらに、リアクタンス値 x_{m2} が “ l o ” であり、リアクタンス値 $x_{m1}, x_{m3} \sim x_{m8}$ が “ h i ” であるとき ($m = 2$)、アレーアンテナ 1 0 は、45 度の方向に指向性があるビームパターン B P M 2 を有する。

【 0 0 3 0 】

50

以下、同様にして、各リアクタンス値 $x_{m3} \sim x_{m8}$ が “10” であり、それ以外のリアクタンス値が “hi” であるとき ($m = 3 \sim 8$)、アレーアンテナ10は、90度、135度、180度、225度、270度および315度の方向に指向性があるビームパターンBPM3～BPM8を有する(図2参照)。

【0031】

このように、指向性切換手段20は、無給電素子であるアンテナ素子1～4, 6～9に装荷されたバラクタダイオード11～18のリアクタンス値 $x_{m1} \sim x_{m8}$ を変えることによってアレーアンテナ10の指向性を切換える。

【0032】

方向推定手段30は、アレーアンテナ10の給電素子であるアンテナ素子5と接続され、アレーアンテナ10のビームパターンが図2に示すビームパターンBPM1～BPM8に切換えられたときの受信信号 $y_m(t)$ をアンテナ素子5から受ける。そして、方向推定手段30は、受信信号 $y_m(t)$ に基づいて、後述する方法によってアレーアンテナ10に到来するコヒーレント波の到来方向を推定する。

【0033】

この発明においては、図1に示す $x-y$ 平面内における方角を示す方位角と、 $x-y$ 平面からの傾きである仰角とを有するコヒーレント波を到来方向推定の対象とする。図3は、方位角および仰角の定義を示す図である。

【0034】

図3を参照して、方位角 θ は、 $x-y$ 平面において x 軸の正の方向を0度とする角度と定義され、仰角 ϕ は、 $x-y$ 平面となす角度と定義される。

【0035】

d (d は自然数) 個のコヒーレント波がアレーアンテナ10に到来している環境を考える。 d 個のコヒーレント波の各々が、方向 (θ_k, ϕ_k) ($k = 1, 2, \dots, d$) から複素振幅 $s_k(t)$ で到来する場合、リアクタンス値セット $x_m (= x_{m1} \sim x_{m8})$ で得られる受信信号ベクトル $\langle Y(t) \rangle$ は、次式によって表わされる。

【0036】

【数1】

$$\begin{aligned} Y(t) &= [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m]^T \\ &= \mathbf{W} \sum_{k=1}^d \mathbf{a}(\psi_k, \phi_k) s_k(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad \dots(1)$$

【0037】

ただし、 $\langle \mathbf{W} \rangle$ は、等価ウェイト行列であり、 $\langle \mathbf{a}(\theta_k, \phi_k) \rangle$ は、入射波の到来方向を示すモードベクトルであり、 $\mathbf{n}(t)$ は、熱雑音であり、 T は、転置を表わす。また、熱雑音 $\mathbf{n}(t)$ は、平均が0であり、分散が σ^2 である。

【0038】

なお、この明細書においては、表記 $\langle \mathbf{A} \rangle$ は、行列 \mathbf{A} またはベクトル \mathbf{A} を意味する。したがって、表記 $\langle \mathbf{W} \rangle$ は、式(1)における行列 \mathbf{W} を表わし、表記 $\langle \mathbf{a}(\theta_k, \phi_k) \rangle$ は、式(1)におけるベクトル $\mathbf{a}(\theta_k, \phi_k)$ を表わす。

【0039】

方向推定手段30は、指向性切換手段20によってアレーアンテナ10の指向性が順次切換えられたとき、式(1)に示す受信信号ベクトル $\langle Y(t) \rangle$ をアレーアンテナ10のアンテナ素子5から受信する。そして、方向推定手段30は、受信信号ベクトル $\langle Y(t) \rangle$ に基づいて、後述する方法によって、 d 個のコヒーレント波間の相関を示す相関行列 $\langle \mathbf{R}_{xx} \rangle$ を演算する。

【0040】

この発明においては、空間平均法を用いて相関行列 $\langle \mathbf{R}_{xx} \rangle$ を演算する。図4は、図1に示すアレーアンテナ10におけるサブアレーの概念図である。図4を参照して、アン

10

20

30

40

50

テナ素子 1 ~ 9 からなるアレーアンテナ 10 を平行移動可能な 4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 に分割する。サブアレー S A 1 は、正方形配置されたアンテナ素子 1, 2, 4, 5 からなり、サブアレー S A 2 は、正方形配置されたアンテナ素子 2, 3, 5, 6 からなり、サブアレー S A 3 は、正方形配置されたアンテナ素子 4, 5, 7, 8 からなり、サブアレー S A 4 は、正方形配置されたアンテナ素子 5, 6, 8, 9 からなる。したがって、4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 の各々は、給電素子 5 を含む 4 本のアンテナ素子からなり、サブアレー S A 1 ~ S A 4 は、相互に平行移動可能である。

【 0 0 4 1 】

このように、この発明においては、各サブアレーが給電素子 5 を含み、かつ、平行移動可能なようにアンテナ素子 1 ~ 9 を 4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 に分割する。

10

【 0 0 4 2 】

アンテナ素子 1 ~ 9 が 4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 に分割されると、4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 に基づいて、空間平均法を適用して相関行列 $\langle R_{x \ x} \rangle$ を演算する。この場合、空間平均法を適用する方法として 2 つの方法がある。1 つ目の方法は、順方向空間平均法であり、2 つ目の方法は、順方向 / 逆方向空間平均法である。以下、この 2 つの空間平均法を適用して相関行列 $\langle R_{x \ x} \rangle$ を演算し、その演算した相関行列 $\langle R_{x \ x} \rangle$ に基づいて到来方向を推定する方法について説明する。

【 0 0 4 3 】

[順方向空間平均法を適用する場合]

順方向空間平均法は、各サブアレー S A 1 ~ S A 4 における部分相関行列を演算して 4 つのサブアレー S A 1 ~ S A 4 に対する 4 つの部分相関行列 $\langle R_{x \ x _ \text{sub} 1} \rangle \sim \langle R_{x \ x _ \text{sub} 4} \rangle$ を求め、その求めた 4 つの部分相関行列 $\langle R_{x \ x _ \text{sub} 1} \rangle \sim \langle R_{x \ x _ \text{sub} 4} \rangle$ を平均して相関行列 $\langle R_{x \ x} \rangle$ を求める方法である。

20

【 0 0 4 4 】

サブアレー S A 1 の受信信号ベクトルを $\langle Y_1(t) \rangle$ とすると、サブアレー S A 1 は、アンテナ素子 1, 2, 4, 5 からなるので、受信信号ベクトル $\langle Y_1(t) \rangle$ は、次式によって表わされる。

【 0 0 4 5 】

【数 2】

$$\mathbf{Y}_1(t) = [y_1(t), y_2(t), y_4(t), y_5(t)]^T \quad \dots (2)$$

30

【 0 0 4 6 】

同様に、サブアレー S A 2 ~ S A 4 の受信信号ベクトル $\langle Y_2(t) \rangle \sim \langle Y_4(t) \rangle$ は、次の式 (3) ~ 式 (5) によって表わされる。

【 0 0 4 7 】

【数 3】

$$\mathbf{Y}_2(t) = [y_2(t), y_3(t), y_5(t), y_6(t)]^T \quad \dots (3)$$

40

【 0 0 4 8 】

【数 4】

$$\mathbf{Y}_3(t) = [y_5(t), y_6(t), y_8(t), y_9(t)]^T \quad \dots (4)$$

【 0 0 4 9 】

【数 5】

$$\mathbf{Y}_4(t) = [y_4(t), y_5(t), y_7(t), y_8(t)]^T \quad \dots (5)$$

50

【 0 0 5 0 】

そうすると、サブアレー S A 1 の部分相関行列 $\langle R_{xx_sub1} \rangle$ は、次式によって表わされる。

【 0 0 5 1 】

【 数 6 】

$$\mathbf{R}_{xx-sub1} = E[\mathbf{Y}_1(t)\mathbf{Y}_1^H(t)] \quad \dots(6)$$

【 0 0 5 2 】

ただし、H は、エルミート転置を表わす。また、 $E[\cdot]$ は、エルゴート性を仮定した時間平均である。 10

【 0 0 5 3 】

同様にしてサブアレー S A 2 ~ S A 4 の部分相関行列 $\langle R_{xx_sub2} \rangle \sim \langle R_{xx_sub4} \rangle$ は、次の式 (7) ~ 式 (9) によって表わされる。

【 0 0 5 4 】

【 数 7 】

$$\mathbf{R}_{xx-sub2} = E[\mathbf{Y}_2(t)\mathbf{Y}_2^H(t)] \quad \dots(7)$$

【 0 0 5 5 】

【 数 8 】

20

$$\mathbf{R}_{xx-sub3} = E[\mathbf{Y}_3(t)\mathbf{Y}_3^H(t)] \quad \dots(8)$$

【 0 0 5 6 】

【 数 9 】

$$\mathbf{R}_{xx-sub4} = E[\mathbf{Y}_4(t)\mathbf{Y}_4^H(t)] \quad \dots(9)$$

【 0 0 5 7 】

そして、4つの部分相関行列 $\langle R_{xx_sub1} \rangle \sim \langle R_{xx_sub4} \rangle$ の平均を演算して次式によって相関行列 $\langle R_{xx} \rangle$ を求める。 30

【 0 0 5 8 】

【 数 10 】

$$\mathbf{R}_{xx} = \frac{1}{4}(\mathbf{R}_{xx-sub1} + \mathbf{R}_{xx-sub2} + \mathbf{R}_{xx-sub3} + \mathbf{R}_{xx-sub4}) \quad \dots(10)$$

【 0 0 5 9 】

式 (6) ~ 式 (9) によって表わされる部分相関行列 $\langle R_{xx_sub1} \rangle \sim \langle R_{xx_sub4} \rangle$ は、サブアレー S A 1 をサブアレー S A 2、サブアレー S A 3 およびサブアレー S A 4 の順に平行移動させたとき、すなわち、サブアレー S A 1 を1つの方向 (時計回り) に平行移動させたときの部分相関行列である。したがって、サブアレー S A 1 を1つの方向に平行移動させたときの4つの部分相関行列 $\langle R_{xx_sub1} \rangle \sim \langle R_{xx_sub4} \rangle$ の平均を演算することを順方向空間平均法という。 40

【 0 0 6 0 】

よって、式 (10) によって演算される相関行列 $\langle R_{xx} \rangle$ は、順方向空間平均法を適用して得られた相関行列である。

【 0 0 6 1 】

なお、順方向空間平均法は、サブアレー 1 を時計回りに平行移動させたときの部分相関行列 $\langle R_{xx_sub1} \rangle \sim \langle R_{xx_sub4} \rangle$ を平均する場合のみならず、サブアレ 50

− 1 を反時計回りに平行移動させたときの 4 つの部分相関行列を平均する場合も含む。すなわち、順方向空間平均法は、サブアレー S A 1 をサブアレー S A 4、サブアレー S A 3 およびサブアレー S A 2 の順に平行移動させたときの 4 つの部分相関行列を演算し、その演算した 4 つの部分相関行列を平均する場合も含む。

【 0 0 6 2 】

相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$ が演算されると、相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$ に固有値分解を施して MUSIC スペクトラム $P_{MUSIC}(\psi, \phi)$ を次式によって演算する。

【 0 0 6 3 】

【 数 1 1 】

$$P_{MUSIC}(\psi, \phi) = \frac{\mathbf{a}_{sub}^H(\psi, \phi) \mathbf{a}_{sub}(\psi, \phi)}{\mathbf{a}_{sub}^H(\psi, \phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}_{sub}(\psi, \phi)} \quad \dots (11)$$

10

【 0 0 6 4 】

ただし、モードベクトル $\langle \mathbf{a}_{sub}(\psi, \phi) \rangle$ は、 $[\mathbf{a}_1(\psi, \phi), \dots, \mathbf{a}_4(\psi, \phi)]^T$ であり、 $\langle \mathbf{E}_N \rangle$ は、相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$ を固有値分解したときの雑音の固有ベクトル $[\mathbf{e}_{d+1}, \dots, \mathbf{e}_4]$ である。

【 0 0 6 5 】

図 5 は、順方向空間平均法を用いて MUSIC スペクトラムを演算した場合のシミュレーション結果を示す図である。また、図 6 は、空間平均法を用いずに MUSIC スペクトラムを演算した場合のシミュレーション結果を示す図である。シミュレーションにおいて使用したデータは、信号出力が 0 [dB] であり、信号対雑音比 SNR は、[dB] である。また、 $(30^\circ, 0^\circ)$ および $(15^\circ, 90^\circ)$ の方向から 2 個のコヒーレント波が入射するとしてシミュレーションが行なわれた。

20

【 0 0 6 6 】

その結果、空間平均法を用いない場合、到来方向を推定することができないが、順方向空間平均法を用いた場合、MUSIC スペクトラムは、2 個のコヒーレント波に対応するピークを示し、到来方向を推定できる。

【 0 0 6 7 】

[順方向 / 逆方向空間平均法を適用する場合]

30

順方向 / 逆方向空間平均法は、サブアレー S A 1 をサブアレー S A 2、サブアレー S A 3 およびサブアレー S A 4 の順に平行移動させたときの 4 つの部分相関行列 $\langle R_{x \times x_sub_f1} \rangle \sim \langle R_{x \times x_sub_f4} \rangle$ の平均からなる順方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_f} \rangle$ と、サブアレー S A 1 をサブアレー S A 4、サブアレー S A 3 およびサブアレー S A 2 の順に平行移動させたときの 4 つの部分相関行列 $\langle R_{x \times x_sub_b1} \rangle \sim \langle R_{x \times x_sub_b4} \rangle$ の平均からなる逆方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_b} \rangle$ とを演算し、その演算した順方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_f} \rangle$ と逆方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_b} \rangle$ との平均を演算して相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$ を求める方法である。

【 0 0 6 8 】

4 つの部分相関行列 $\langle R_{x \times x_sub_f1} \rangle \sim \langle R_{x \times x_sub_f4} \rangle$ は、上述した式 (6) ~ 式 (9) によって表わされるので、順方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_f} \rangle$ は、上述した式 (10) によって表わされる。

40

【 0 0 6 9 】

次に、逆方向部分相関行列 $\langle R_{x \times x_b} \rangle$ の求め方について説明する。

【 0 0 7 0 】

アンテナ素子 1 ~ 9 の全体への逆方向入力ベクトルを $\langle Y_b(t) \rangle$ とすると、逆方向入力ベクトル $\langle Y_b(t) \rangle$ は、次式によって表わされる。

【 0 0 7 1 】

【数 1 2】

$$\mathbf{Y}_b(t) = [y_m^*(t), y_{m-1}^*(t), \dots, y_1^*(t)]^T = \mathbf{J}\mathbf{Y}^*(t) \quad \dots(12)$$

【0 0 7 2】

ただし、* は、複素共役を表わす。また、行列 < J > は、次式によって表わされる m 次の正方行列である。

【0 0 7 3】

【数 1 3】

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \\ 0 & \dots & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad \dots(13)$$

10

【0 0 7 4】

式 (1 2) の逆方向入力ベクトル < Y_b (t) > は、式 (1) の受信信号ベクトル < Y (t) > に比べて、各到来信号の位相関係が異なるだけで同類・同形と見なせる。この位相関係を空間平均の位相平均化に利用して逆方向入力ベクトル < Y_b (t) > による相関行列も空間平均の要素に組み込む。

20

【0 0 7 5】

式 (1 2) に示される逆方向入力ベクトル < Y_b (t) > をサブアレー SA 1 ~ SA 4 に分割し、上述した式 (6) ~ 式 (9) と同じ方法によって、4 つの部分相関行列 < R_{xx_{b_{sub}1}} > ~ < R_{xx_{b_{sub}4}} > を演算し、その演算した 4 つの部分相関行列 < R_{xx_{b_{sub}1}} > ~ < R_{xx_{b_{sub}4}} > を平均して逆方向部分相関行列 < R_{xx_b} > を演算する。

【0 0 7 6】

サブアレー SA 1 の逆方向入力ベクトルを < Y_{b1} (t) > とすると、サブアレー SA 1 は、アンテナ素子 1, 2, 4, 5 からなるので、逆方向入力ベクトルを < Y_{b1} (t) > は、次式によって表わされる。

30

【0 0 7 7】

【数 1 4】

$$\mathbf{Y}_{b1}(t) = [y_5^*(t), y_4^*(t), y_2^*(t), y_1^*(t)]^T = \mathbf{J}\mathbf{Y}_{b1}^*(t) \quad \dots(14)$$

【0 0 7 8】

同様に、サブアレー SA 2 ~ SA 4 の逆方向入力ベクトル < Y_{b2} (t) > ~ < Y_{b4} (t) > は、次の式 (1 5) ~ 式 (1 7) によって表わされる。

40

【0 0 7 9】

【数 1 5】

$$\mathbf{Y}_{b2}(t) = [y_6^*(t), y_5^*(t), y_3^*(t), y_2^*(t)]^T = \mathbf{J}\mathbf{Y}_{b2}^*(t) \quad \dots(15)$$

【0 0 8 0】

【数 1 6】

$$\mathbf{Y}_{b3}(t) = [y_9^*(t), y_8^*(t), y_6^*(t), y_5^*(t)]^T = \mathbf{J}\mathbf{Y}_{b3}^*(t) \quad \dots(16)$$

50

【 0 0 8 1 】

【 数 1 7 】

$$\mathbf{Y}_{b4}(t) = [y_8^*(t), y_7^*(t), y_5^*(t), y_4^*(t)]^T = \mathbf{J}\mathbf{Y}_{b4}^*(t) \quad \dots(17)$$

【 0 0 8 2 】

そうすると、サブアレー S A 1 の部分相関行列 $\langle R_{xx-b-sub1} \rangle$ は、次式によって表わされる。

【 0 0 8 3 】

【 数 1 8 】

10

$$\mathbf{R}_{xx-b-sub1} = E[\mathbf{Y}_{b1}(t)\mathbf{Y}_{b1}^H(t)] \quad \dots(18)$$

【 0 0 8 4 】

同様にしてサブアレー S A 2 ~ S A 4 の部分相関行列 $\langle R_{xx-b-sub2} \rangle \sim \langle R_{xx-b-sub4} \rangle$ は、次の式 (1 9) ~ 式 (2 1) によって表わされる。

【 0 0 8 5 】

【 数 1 9 】

$$\mathbf{R}_{xx-b-sub2} = E[\mathbf{Y}_{b2}(t)\mathbf{Y}_{b2}^H(t)] \quad \dots(19)$$

20

【 0 0 8 6 】

【 数 2 0 】

$$\mathbf{R}_{xx-b-sub3} = E[\mathbf{Y}_{b3}(t)\mathbf{Y}_{b3}^H(t)] \quad \dots(20)$$

【 0 0 8 7 】

【 数 2 1 】

$$\mathbf{R}_{xx-b-sub4} = E[\mathbf{Y}_{b4}(t)\mathbf{Y}_{b4}^H(t)] \quad \dots(21)$$

30

【 0 0 8 8 】

そして、4つの部分相関行列 $\langle R_{xx-b-sub1} \rangle \sim \langle R_{xx-b-sub4} \rangle$ の平均を演算して次式によって逆方向部分相関行列 $\langle R_{xx-b} \rangle$ を求める。

【 0 0 8 9 】

【 数 2 2 】

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx-b} &= \frac{1}{4}(\mathbf{R}_{xx-b-sub1} + \mathbf{R}_{xx-b-sub2} + \mathbf{R}_{xx-b-sub3} + \mathbf{R}_{xx-b-sub4}) \\ &= \mathbf{J}\mathbf{R}_{xx}^*\mathbf{J} \quad \dots(22) \end{aligned}$$

40

【 0 0 9 0 】

順方向部分相関行列 $\langle R_{xx-f} \rangle = \langle R_{xx} \rangle$ であるので、順方向 / 逆方向空間平均法を適用した場合の相関行列 $\langle R_{xx}^{fb} \rangle$ は、次式によって表わされる。

【 0 0 9 1 】

【 数 2 3 】

$$\mathbf{R}_{xx}^{fb} = \frac{1}{2}(\mathbf{R}_{xx-f} + \mathbf{R}_{xx-b}) = \frac{\mathbf{R}_{xx} + \mathbf{J}\mathbf{R}_{xx}^*\mathbf{J}}{2} \quad \dots(23)$$

50

【0092】

そして、上述した方法によって相関行列 $\langle R_{x \times x}^{f \ b} \rangle$ に固有値分解を施して MUSIC スペクトラムを演算することによって、順方向 / 逆方向空間平均法を適用した場合の到来方向を推定できる。

【0093】

順方向 / 逆方向空間平均法を適用することによって、サブアレー SA1 をサブアレー SA2、サブアレー SA3 およびサブアレー SA4 の順に平行移動させ、さらに、サブアレー SA1 をサブアレー SA4、サブアレー SA3 およびサブアレー SA2 の順に平行移動させるので、部分相関行列を演算するサブアレーの数が実質的に増加し、推定可能な到来方向の数を増加させることができる。

10

【0094】

上記においては、アレーアンテナ 10 のアンテナ素子 1 ~ 9 を、各々が 4 本のアンテナ素子からなる 4 つのサブアレー SA1 ~ SA4 に分割して空間平均法を適用する場合について説明したが、他の方法によってアンテナ素子 1 ~ 9 をサブアレーに分割してもよい。

【0095】

図 7 は、図 1 に示す 9 本のアンテナ素子 1 ~ 9 をサブアレーに分割する他の方法を示す図である。図 7 を参照して、アンテナ素子 1 ~ 9 は、2 つのサブアレー SA5, SA6 に分割される。サブアレー SA5 は、アンテナ素子 1 ~ 6 からなり、サブアレー SA6 は、アンテナ素子 4 ~ 9 からなる。したがって、2 つのサブアレー SA5, SA6 の各々は、給電素子 5 を含む 6 本のアンテナ素子からなり、サブアレー SA5, SA6 は、相互に平行移動可能である。

20

【0096】

サブアレー SA5, SA6 に上述した順方向空間平均法および順方向 / 逆方向空間平均法を適用して相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$, $\langle R_{x \times x}^{f \ b} \rangle$ を演算し、その演算した相関行列 $\langle R_{x \times x} \rangle$, $\langle R_{x \times x}^{f \ b} \rangle$ に固有値分解を施してコヒーレント波の到来方向を推定できる。

【0097】

なお、アンテナ素子 1 ~ 9 を、アンテナ素子 1, 2, 4, 5, 7, 8 からなるサブアレーと、アンテナ素子 3, 6, 8, 9 からなるサブアレーとに分割しても、サブアレー SA5, SA6 に分割した場合と結果は同じである。

【0098】

推定可能な到来方向の数について説明する。サブアレーの数を M (M は自然数) 個、各サブアレーの素子数を K (K は自然数) 個とすると、順方向 / 逆方向空間平均法を適用した場合、到来するコヒーレント波の個数が d 個であるので、 $2M \geq d$ である。一方、MUSIC 法の適用条件としてサブアレーの素子数 K は、 $K \geq d + 1$ を満たす必要がある。

30

【0099】

その結果、アンテナ素子 1 ~ 9 を 4 つのサブアレー SA1 ~ SA4 に分割した場合、 $M = 4$ であり、 $K = 4$ であるので、 $d = 3$ となり、推定可能な到来方向は最大 3 個となる。

【0100】

一方、アンテナ素子 1 ~ 9 を 2 つのサブアレー SA5, SA6 に分割した場合、 $M = 2$ であり、 $K = 6$ であるので、 $d = 4$ となり、推定可能な到来方向は最大 4 個となる。

40

【0101】

したがって、推定可能な到来方向を増加させるには、平行移動が可能であり、かつ、アンテナ素子ができる限り多くなるようにアンテナ素子 1 ~ 9 をサブアレーに分割する。アンテナ素子 1 ~ 9 の場合には、図 4 に示すサブアレー SA1 ~ SA4 に分割するよりも、図 7 に示すサブアレー SA5, SA6 に分割した方が推定可能な到来方向の数を増加させることができ、サブアレー SA5, SA6 に分割したとき、推定可能な到来方向の数を最大 4 個まで増加させることができる。

【0102】

順方向 / 逆方向空間平均法を適用することにより、推定可能な到来方向が増加する。これは、実質的にサブアレーの数が増加するからである。しかし、推定可能な到来方向は、

50

上述した $2M - d$ および $K - d + 1$ の関係によって制限され、この2つの関係から決定された推定可能な到来方向の数の範囲内において、順方向 / 逆方向空間平均法を適用することによって推定可能な到来方向が増加する。

【0103】

図8は、図1に示す到来方向推定装置100における到来方向を推定する動作を説明するためのフローチャートである。図8を参照して、一連の動作が開始されると、指向性切換手段20は、制御電圧セット $CVL1 \sim CVL8$ をバラクタダイオード $11 \sim 18$ に供給する。そして、アレーアンテナ10は、指向性を0度方向、45度方向、90度方向、135度方向、180度方向、225度方向、270度方向および315度方向に順次切換えてコヒーレント波を受信し（ステップS1）、その受信した受信信号 $y_1(t)$, $y_2(t)$, \dots をアンテナ素子5から方向推定手段30へ出力する。

10

【0104】

方向推定手段30は、アレーアンテナ10から受けた受信信号 $y_1(t)$, $y_2(t)$, \dots , $y_m(t)$ を式(1)に代入して受信信号ベクトル $\langle Y(t) \rangle$ を生成する（ステップS2）。

【0105】

そして、方向推定手段30は、アレーアンテナ10のアンテナ素子1~9を平行移動可能な複数のサブアレー $SA1 \sim SA4$ に分割し、その分割した複数のサブアレー $SA1 \sim SA4$ における複数の部分相関行列を演算する（ステップS3）。

【0106】

その後、方向推定手段30は、複数の部分相関行列に空間平均法を適用して相関行列を演算する（ステップS4）。この場合、方向推定手段30は、上述した順方向空間平均法および順方向 / 逆方向空間平均法のいずれかを適用して相関行列を演算する。

20

【0107】

方向推定手段30は、相関行列を演算すると、その演算した相関行列に固有値分解を施してMUSICスペクトラムを演算し、MUSICスペクトラムに基づいてコヒーレント波の到来方向を推定する（ステップS5）。そして、一連の動作は終了する。

【0108】

このように、この発明による到来方向の推定方法は、複数の部分相関行列の演算、複数の部分相関行列に空間平均法を適用した相関行列の演算および相関行列に固有値分解を施したMUSICスペクトラムの演算の3つの演算を含むだけであり、従来の6本の無給電素子を円形配列した場合のように菱形を平行移動する3つの方向の各々において演算された3つのMUSICスペクトラムを合成する演算が不要であり、従来の推定方法に比べ、演算を簡単にできる。

30

【0109】

このように演算が簡単になるのは、9本のアンテナ素子1~9を2次元矩形対称に配置した結果、1つの方向（順方向または逆方向）に平行移動可能な複数のサブアレーを形成することができるようになったためである。

【0110】

また、9本のアンテナ素子1~9を2次元矩形対称に配置した結果、アンテナ素子数を多くした2つのサブアレーを形成できるようになり、推定可能な到来方向を3個から4個に増加させることができる。

40

【0111】

なお、図8に示す動作は、実際には、CPU (Central Processing Unit) によって実行される。CPUは、図8に示す各ステップを備えるプログラムをROM (Read Only Memory) から読出し、その読出したプログラムを実行して図8に示すフローチャートに従ってコヒーレント波の到来方向を推定する。

【0112】

上記においては、アレーアンテナ10のアンテナ素子は9本であると説明したが、この発明においては、これに限らず、アレーアンテナ10は、9以上の奇数からなるN本のア

50

ンテナ素子を含むものであればよい。アンテナ素子の本数が奇数であれば、2次元矩形対称配置が可能であるからである。そして、この場合、N本のアンテナ素子のうち、1本のアンテナ素子が給電素子であり、残りのN - 1本のアンテナ素子が無給電素子である。

【0113】

今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は、上記した実施の形態の説明ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【産業上の利用可能性】

【0114】

この発明は、簡単な演算によりコヒーレント波の到来方向を推定可能な到来方向推定装置に適用される。

【図面の簡単な説明】

【0115】

【図1】この発明の実施の形態による到来方向推定装置の概略図である。

【図2】図1に示すx - y平面におけるアンテナ素子の平面配置図である。

【図3】方位角および仰角の定義を示す図である。

【図4】図1に示すアレーアンテナにおけるサブアレーの概念図である。

【図5】順方向空間平均法を用いてMUSICスペクトラムを演算した場合のシミュレーション結果を示す図である。

【図6】空間平均法を用いずにMUSICスペクトラムを演算した場合のシミュレーション結果を示す図である。

【図7】図1に示す9本のアンテナ素子をサブアレーに分割する他の方法を示す図である。

【図8】図1に示す到来方向推定装置における到来方向を推定する動作を説明するためのフローチャートである。

【符号の説明】

【0116】

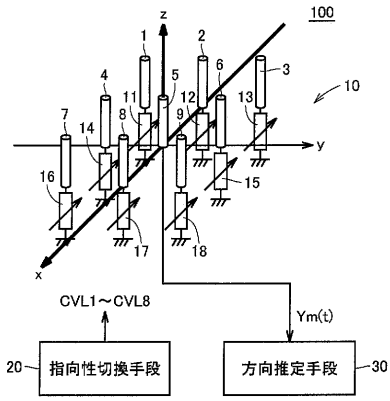
1 ~ 9 アンテナ素子、10 アレーアンテナ、11 ~ 18 パラクタダイオード、20 指向性切換手段、30 方向推定手段、100 到来方向推定装置、BPM0 ~ BPM8 ビームパターン、SA1 ~ SA6 サブアレー。

10

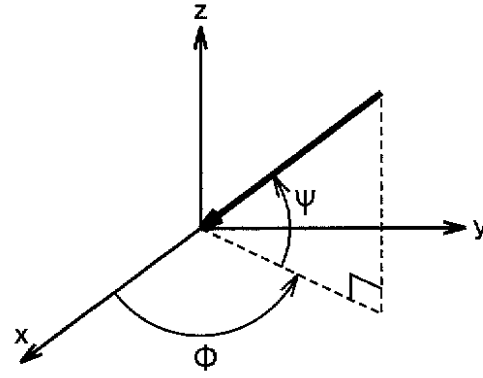
20

30

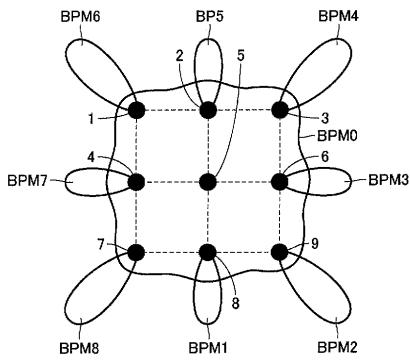
【図1】



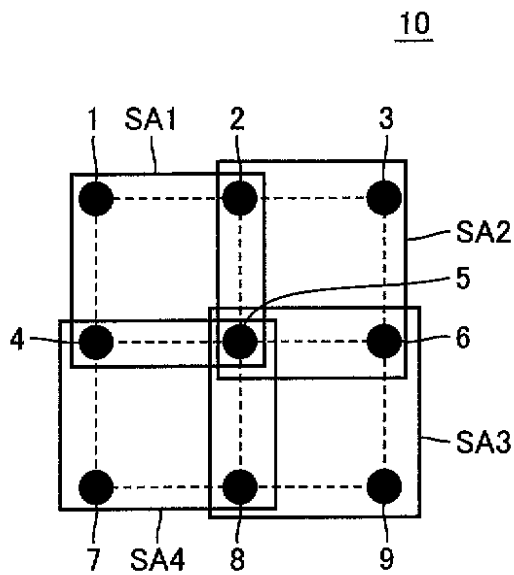
【図3】



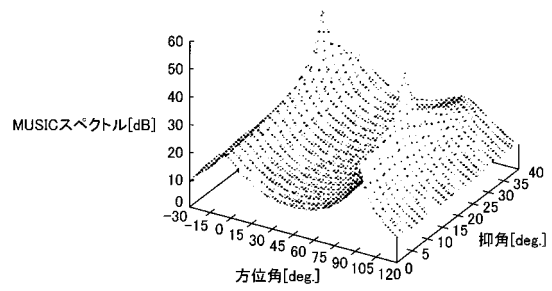
【図2】



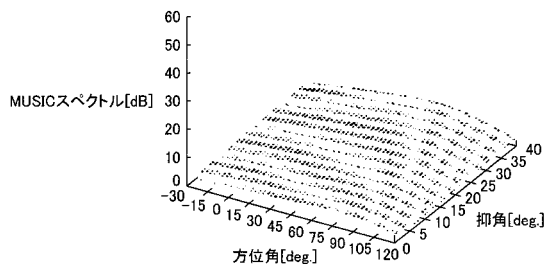
【図4】



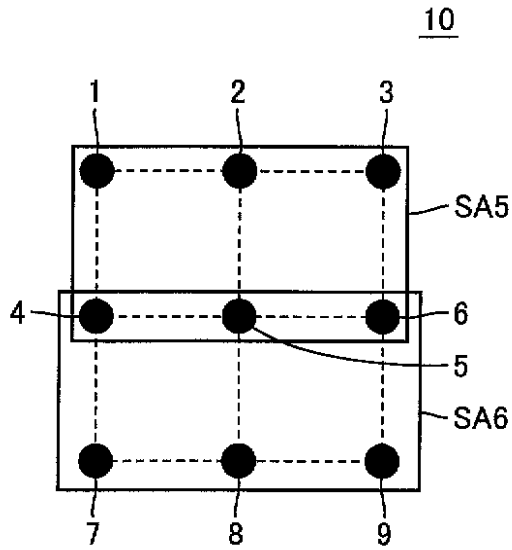
【図5】



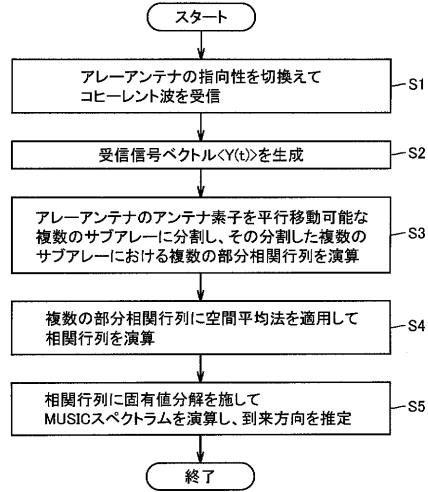
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

審査官 川瀬 徹也

- (56)参考文献 特開平11-248812(JP,A)
特開2001-024431(JP,A)
特開2001-183437(JP,A)
特開2004-101522(JP,A)
特開2004-361377(JP,A)
特開平07-333322(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01S 3/00 - 3/74
G01S 7/00 - 7/42
G01S 13/00 - 13/95
H01Q 3/00 - 3/46
H01Q 21/00 - 25/04