



(86) Date de dépôt PCT/PCT Filing Date: 2012/03/29
(87) Date publication PCT/PCT Publication Date: 2012/12/20
(45) Date de délivrance/Issue Date: 2018/03/27
(85) Entrée phase nationale/National Entry: 2013/09/25
(86) N° demande PCT/PCT Application No.: FR 2012/050682
(87) N° publication PCT/PCT Publication No.: 2012/172204
(30) Priorité/Priority: 2011/03/31 (FR1152774)

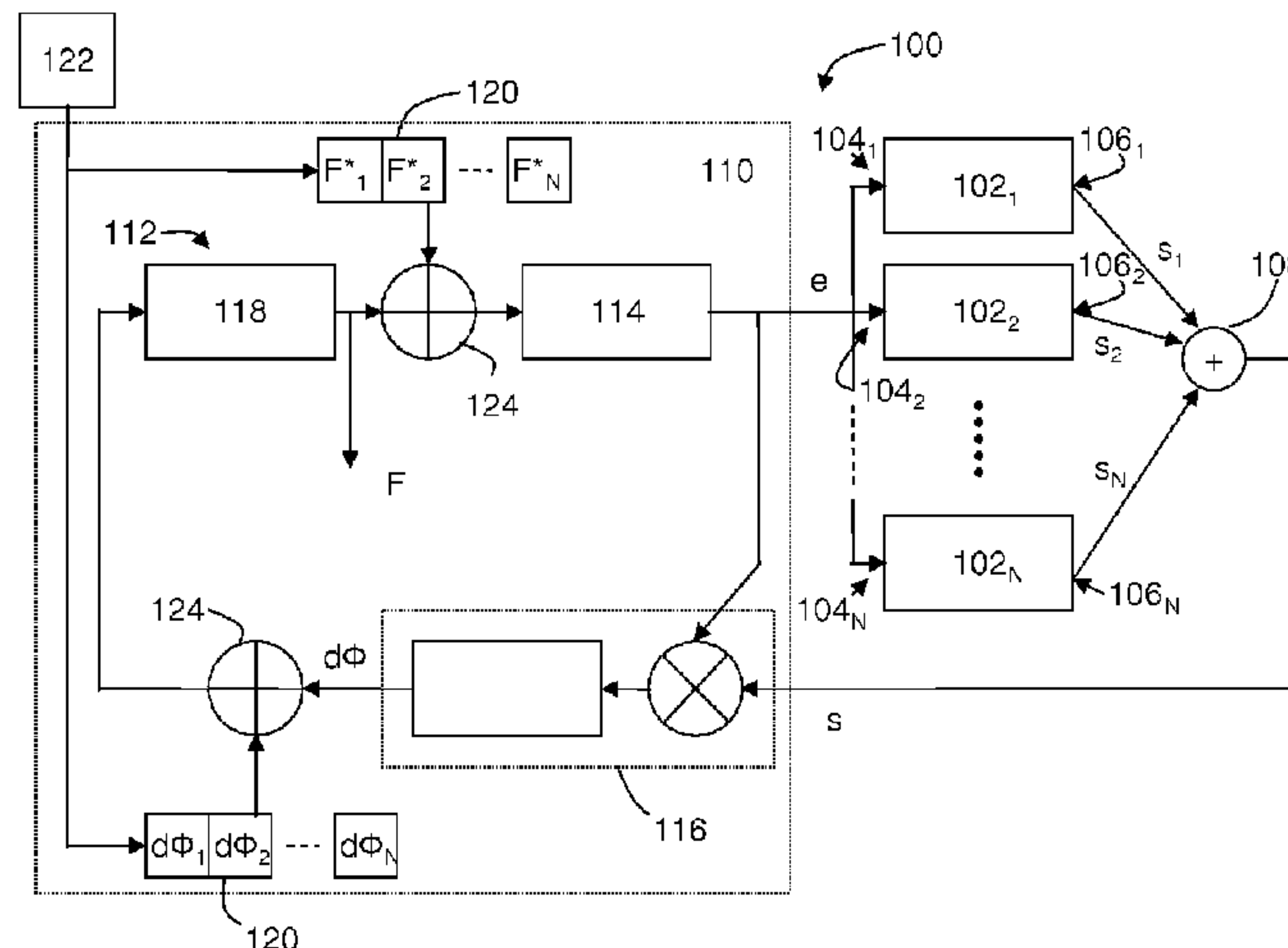
(51) Cl.Int./Int.Cl. *G01D 5/02* (2006.01),
B81B 7/00 (2006.01), *G01D 5/14* (2006.01)

(72) Inventeurs/Inventors:
COLINET, ERIC, FR;
ANDREUCCI, PHILIPPE, FR;
DURAFFOURG, LAURENT, FR;
HENTZ, SEBASTIEN, FR

(73) Propriétaire/Owner:
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX
ENERGIES ALTERNATIVES, FR

(74) Agent: ROBIC

(54) Titre : SYSTEME DE MESURE A RESONATEURS ELECTROMECHANQUES, PROCEDE DE FABRICATION D'UN
TEL SYSTEME ET PROCEDE DE LECTURE D'AU MOINS DEUX RESONATEURS ELECTROMECHANQUES
(54) Title: MEASURING SYSTEM HAVING ELECTROMECHANICAL RESONATORS, METHOD FOR
MANUFACTURING SUCH A SYSTEM, AND METHOD FOR READING AT LEAST TWO RESONATORS



(57) Abrégé/Abstract:

Système de mesure à résonateurs électromécaniques, comportant au moins deux résonateurs électromécaniques (102₁...102_N) présentant chacun une fréquence de résonance variant autour d'une fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, et au moins un dispositif de lecture (110) connecté aux entrées des résonateurs et conçu pour fournir un signal d'excitation sur lesdites entrées. Le système comporte en outre une mémoire (120) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur, et chaque dispositif de lecture (110) est destiné à déterminer la fréquence de résonance d'un ou plusieurs résonateurs sélectionnés pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture (110) à partir de l'information de résonance à vide mémorisée pour chaque résonateur sélectionné.

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international(43) Date de la publication internationale
20 décembre 2012 (20.12.2012)

WIPO | PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/172204 A1(51) Classification internationale des brevets :
G01D 5/02 (2006.01) *B81B 7/00* (2006.01)
G01D 5/14 (2006.01)Clos de Maubec, F-38500 Voiron (FR). **HENTZ, Sébastien** [—/FR]; 8, rue du Lavoisier, F-38760 Varces Allières et Risset (FR).(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR2012/050682(74) Mandataire : **BONNET, Michel**; Cabinet Bonnet, Boîte n° 10, 93, rue Réaumur, F-75002 Paris (FR).(22) Date de dépôt international :
29 mars 2012 (29.03.2012)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
1152774 31 mars 2011 (31.03.2011) FR(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES** [FR/FR]; 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : **COLINET, Eric** [FR/FR]; 163, rue Herzog, F-76230 Bois-Guillaume (FR). **ANDREUCCI, Philippe** [FR/FR]; 4, lotissement le Verger, Rue de Stalingrad, F-38430 Moirans (FR). **DURAFFOURG, Laurent** [FR/FR]; 25, rue de Maubec, Le

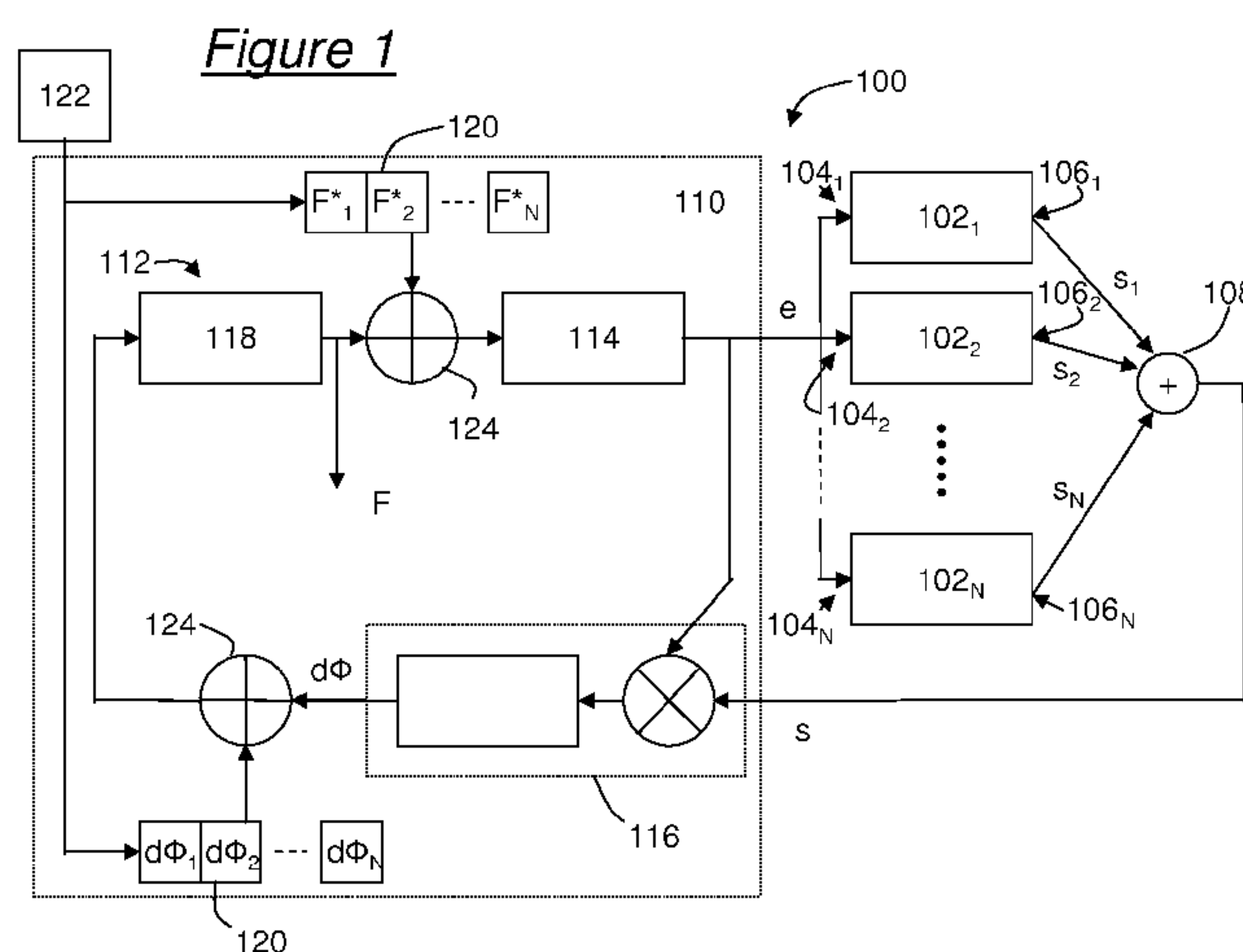
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : MEASURING SYSTEM HAVING ELECTROMECHANICAL RESONATORS, METHOD FOR MANUFACTURING SUCH A SYSTEM, AND METHOD FOR READING AT LEAST TWO RESONATORS

(54) Titre : SYSTEME DE MESURE A RESONATEURS ELECTROMECHANIQUES, PROCEDE DE FABRICATION D'UN TEL SYSTEME ET PROCEDE DE LECTURE D'AU MOINS DEUX RESONATEURS ELECTROMECHANIQUES

(57) Abstract : The invention relates to a measuring system having electromechanical resonators, comprising at least two electromechanical resonators (102₁...102_N) which each have a resonance frequency that varies around a vacuum resonance frequency depending on a physical quantity to be measured, and at least one reading device (110) connected to the inputs of the resonators and designed to supply an energizing signal to said inputs. The system further comprises a memory (120) in which, for each resonator, vacuum resonance data pertaining to the vacuum resonance frequency of the resonator is recorded, and each reading device (110) is to determine the resonance frequency of one or more resonators selected for reading by configuring at last one element of the reading device (110) from the vacuum resonance data stored for each selected resonator.

(57) Abrégé :

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/172204 A1

SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG). **Publiée :**

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

Déclarations en vertu de la règle 4.17 :

— relative à la qualité d'inventeur (règle 4.17.iv))

Système de mesure à résonateurs électromécaniques, comportant au moins deux résonateurs électromécaniques (102₁...102_N) présentant chacun une fréquence de résonance variant autour d'une fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, et au moins un dispositif de lecture (110) connecté aux entrées des résonateurs et conçu pour fournir un signal d'excitation sur lesdites entrées. Le système comporte en outre une mémoire (120) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur, et chaque dispositif de lecture (110) est destiné à déterminer la fréquence de résonance d'un ou plusieurs résonateurs sélectionnés pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture (110) à partir de l'information de résonance à vide mémorisée pour chaque résonateur sélectionné.

Système de mesure à résonateurs électromécaniques, procédé de fabrication
d'un tel système et procédé de lecture d'au moins deux résonateurs
électromécaniques

5 La présente invention concerne un système de mesure à résonateurs électromécaniques, un procédé de fabrication d'un tel système et un procédé de lecture d'au moins deux résonateurs électromécaniques.

L'invention s'applique plus particulièrement dans les domaines des capteurs de gaz, de masse spectrométrique, et dans le domaine des bolomètres.

10 Dans le cadre de la présente invention, un microsystème électromécanique (ou MEMS, de l'anglais « Micro Electro Mechanical Systems ») est défini comme un système utilisant l'électricité comme source d'énergie et comprenant une structure mécanique dont la forme assure au moins en partie une fonction de capteur et/ou d'actionneur, la structure mécanique présentant des dimensions micrométriques,
15 c'est-à-dire inférieures à un millimètre.

Un nanosystème électromécanique (ou NEMS, de l'anglais « Nano Electro Mechanical Systems ») est similaire à un MEMS, si ce n'est que sa structure mécanique présente des dimensions nanométriques, c'est-à-dire inférieures à un micromètre.

20 Les systèmes électromécaniques de mesure comportent usuellement des résonateurs électromécaniques, c'est-à-dire des dispositifs présentant un fonctionnement liant un mouvement mécanique avec un fonctionnement électrique. Ces dispositifs sont destinés à recevoir un signal d'excitation (mécanique ou électrique) et à fournir en réponse un signal de sortie (généralement électrique), ce
25 dernier dépendant également d'une grandeur physique à laquelle le résonateur électromécanique est soumis. Ces dispositifs présentent une fonction de transfert comportant généralement un pic de résonance pour une certaine fréquence de résonance, cette fréquence de résonance variant en même temps que la grandeur physique. Dans la suite, on parlera de fréquence de résonance à vide pour désigner
30 la fréquence de résonance présentée par le résonateur électromécanique en l'absence de la grandeur physique à mesurer.

Des résonateurs électromécaniques souvent utilisés sont des résonateurs MEMS ou bien des résonateurs NEMS.

Suivant l'application, un réseau de plusieurs centaines voire plusieurs milliers de résonateurs NEMS peut être nécessaire.

La demande de brevet publiée sous le numéro FR 2 942 681 A1 propose un adressage individuel de chaque résonateur NEMS à l'aide d'une technique d'interconnexion appropriée. Cette approche présente l'avantage de pouvoir réaliser une lecture individualisée de chaque résonateur NEMS, ainsi qu'un traitement électronique individualisé pour chaque structure et ainsi permettre par exemple de compenser les incertitudes de fabrication, d'assurer une meilleure décorrélation des sources de bruit affectant la mesure.

Cependant, un résonateur NEMS présente au moins deux plots d'interconnexion avec son électronique de lecture. De ce fait, en considérant à titre d'exemple mille résonateurs NEMS à interroger individuellement, il se pose un problème technologique important puisqu'il faut alors réaliser au moins deux mille interconnexions. Pour certaines applications, par exemple l'application à des bolomètres à base de résonateurs NEMS ou bien l'application à la détection de masse spectrométrie telle que celle présentée dans l'article de la revue Nature Nanotechnology : « Towards single-molecule nanomechanical mass spectrometry » publié en ligne le 21 juin 2009 (DOI: 10.1038/NNANO.2009.152) de Naik et al, il est absolument indispensable de disposer d'une matrice hyperdense de plus de 100 000 résonateurs NEMS pour améliorer les performances du système. Le problème d'interconnexion est donc d'autant plus important pour ces systèmes.

Outre la problématique de réalisation technologique des interconnexions, il se pose également le problème de la réalisation d'une électronique de lecture individuelle pour chaque résonateur NEMS. En effet, si l'on considère une démarche d'intégration où la couche électronique est positionnée en dessous de la couche de résonateurs NEMS et où chaque résonateur NEMS occupe une surface de $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ (taille caractéristique d'un résonateur NEMS avec ses plots interconnexions), l'électronique de lecture devra occuper une surface inférieure à $25\text{ }\mu\text{m}^2$. Avec les technologies actuelles CMOS, concevoir une électronique capable d'assurer un suivi dynamique de l'évolution de la fréquence du résonateur NEMS tout en remplissant cette contrainte de surface est quasi-impossible.

Il peut ainsi être souhaité de prévoir un système électromécanique de mesure qui permette de s'affranchir d'au moins une partie des problèmes et contraintes précités.

La présente invention vise un système de mesure à résonateurs électromécaniques, comportant :

- au moins deux résonateurs électromécaniques ($102_1 \dots 102_N$; 1902) présentant chacun une fréquence de résonance variant autour d'une fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902) étant muni :
 - d'une entrée ($104_1 \dots 104_N$) destinée à recevoir un signal d'excitation (e),
 - 10 - d'une sortie ($106_1 \dots 106_N$) pour fournir un signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) en réponse au signal d'excitation (e), le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902), et chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902) comportant une structure mécanique définissant sa fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902) étant différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres,
 - au moins un dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) connecté aux entrées des résonateurs et conçu pour fournir un signal d'excitation sur lesdites entrées,
 - 20 - une mémoire (120 ; $120_1 \dots 120_M$; 1906) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur,
- chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) étant destiné à déterminer la fréquence de résonance d'un ou plusieurs résonateurs sélectionnés pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) à partir de l'information de résonance à vide mémorisée pour chaque résonateur sélectionné,
- le système étant caractérisé en ce que chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) comporte une boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) destinée à
- 30 recevoir le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) et à fournir le signal d'excitation (e) en fonction du signal de sortie ($s_1 \dots s_N$).

La présente invention vise aussi un procédé de fabrication du système, comportant pour le dimensionnement des résonateurs électromécaniques ($102_1 \dots 102_N$; 1902) :

3a

- déterminer, pour chaque résonateur, un intervalle de variation maximale attendue de sa fréquence de résonance autour de sa fréquence de résonance à vide, et
- choisir des structures mécaniques des résonateurs définissant des fréquences de résonance à vide suffisamment écartées les unes des autres pour que les intervalles déterminés ne se chevauchent pas.

La présente invention vise aussi un procédé de lecture d'au moins deux résonateurs électromécaniques ($102_1 \dots 102_N$; 1902) comportant chacun une structure mécanique définissant une fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs ($102_1 \dots 102_N$) étant différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres, et présentant chacun une fréquence de résonance variant autour de la fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$) étant muni d'une entrée ($104_1 \dots 104_N$) destinée à recevoir un signal d'excitation (e) et d'une sortie ($106_1 \dots 106_N$) pour fournir, en réponse au signal d'excitation (e), un signal de sortie ($s_1 \dots s_N$), le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur électromécanique ($102_1 \dots 102_N$), le procédé utilisant un dispositif de lecture comportant une mémoire (120 ; $120_1 \dots 120_M$; 1906) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur et une boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) destinée à recevoir le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) et à fournir le signal d'excitation (e) en fonction du signal de sortie ($s_1 \dots s_N$), et comportant :

- sélectionner, parmi les résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902), un ou plusieurs résonateurs à lire,
- récupérer, dans ladite mémoire, l'information de résonance à vide de chaque résonateur sélectionné pour lecture,
- appliquer un signal d'excitation (e) au moyen de la boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) aux résonateurs et déterminer la fréquence de résonance de chaque résonateur sélectionné pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture à partir de l'information de résonance à vide de ce résonateur,
- déterminer, pour chaque résonateur sélectionné, la grandeur physique à partir de la fréquence de résonance déterminée et de la fréquence de résonance à vide du résonateur.

Des modes de réalisation préférentiels sont décrits ci-dessous.

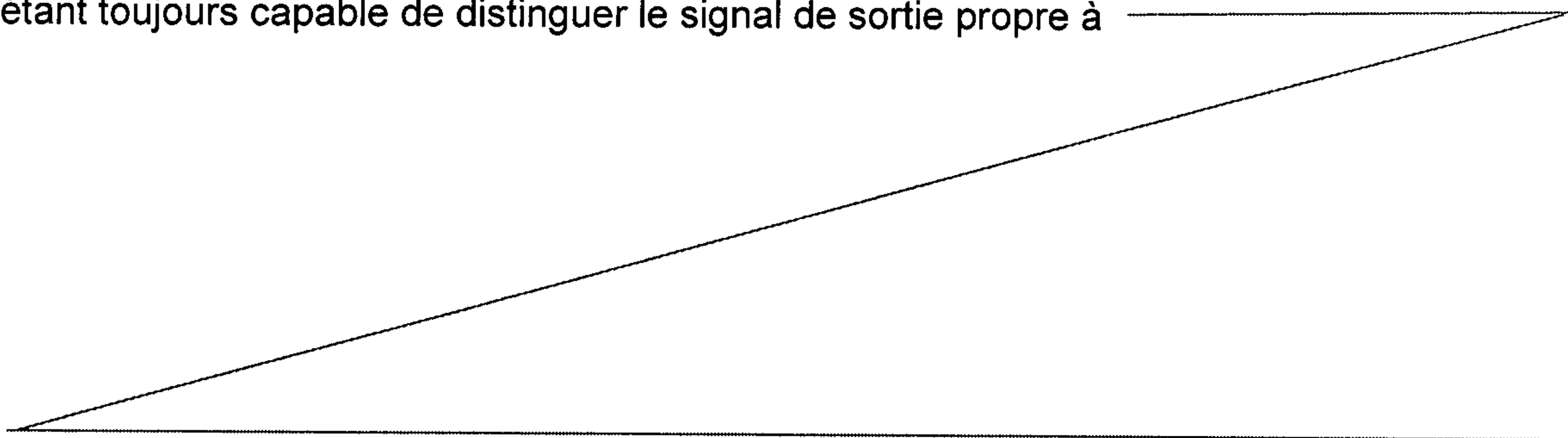
L'invention a donc pour objet un système de mesure à résonateurs électromécaniques, comportant :

- au moins deux résonateurs électromécaniques présentant chacun une fréquence de résonance variant autour d'une fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur étant muni :
 - d'une entrée destinée à recevoir un signal d'excitation,
 - d'une sortie pour fournir un signal de sortie en réponse au signal d'excitation, le signal de sortie présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur,
- et chaque résonateur comportant une structure mécanique définissant sa fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs étant différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres,
- au moins un dispositif de lecture connecté aux entrées des résonateurs et conçu pour fournir un signal d'excitation sur lesdites entrées,

le système comporte en outre une mémoire dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur,

et chaque dispositif de lecture est destiné à déterminer la fréquence de résonance d'un ou plusieurs résonateurs sélectionnés pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture à partir de l'information de résonance à vide mémorisée pour chaque résonateur sélectionné.

Grâce à l'invention et moyennant un choix judicieux des différentes fréquences de résonance à vide, il est possible d'interconnecter en parallèle les sorties des résonateurs électromécaniques, c'est-à-dire de connecter ensemble ces sorties, tout en étant toujours capable de distinguer le signal de sortie propre à



chaque résonateur électromécanique. Ainsi, l'invention permet d'obtenir un système de mesure avec un nombre réduit de connexions.

De façon optionnelle, le système comporte en outre des moyens de sommation des signaux de sortie en un signal total de sortie.

5 De façon optionnelle, chaque dispositif de lecture est conçu pour déterminer, à partir du signal total de sortie, la fréquence de résonance d'un seul résonateur sélectionné.

De façon optionnelle, chaque dispositif de lecture est conçu pour successivement déterminer, à partir du signal total de sortie, la fréquence de
10 résonance de plusieurs résonateurs sélectionnés.

De façon optionnelle, les moyens de sommation comportent un nœud auquel les sorties des résonateurs sont connectées.

De façon optionnelle, pour chaque résonateur, l'information de résonance à vide est une bande passante s'étendant autour de la fréquence de résonance à vide,
15 chaque dispositif de lecture comporte au moins une boucle d'auto-oscillation comportant un démultiplexeur destiné à extraire, du signal total de sortie, chacun des signaux de sortie des résonateurs sélectionnés pour lecture, l'extraction étant réalisée, pour chaque résonateur sélectionné pour lecture, dans la bande passante propre à ce résonateur.

20 De façon optionnelle, l'information de résonance à vide propre à chaque résonateur est la fréquence de résonance à vide de ce résonateur.

De façon optionnelle, chaque dispositif de lecture est conçu pour déterminer la fréquence de résonance d'un seul résonateur, comporte des moyens de sélection de la fréquence de résonance à vide du résonateur sélectionné pour lecture, et est
25 conçu pour fournir, au démarrage de la lecture, un signal d'excitation monofréquentiel de fréquence égale à la fréquence de résonance à vide sélectionnée.

De façon optionnelle, chaque dispositif de lecture comporte un circuit de boucle à phase asservie conçu pour caler, après démarrage de la lecture, la
30 fréquence du signal d'excitation sur la fréquence d'un pic de résonance du signal total correspondant au résonateur sélectionné pour lecture et pour fournir, en tant que fréquence de résonance déterminée, la fréquence calée.

De façon optionnelle, chaque circuit à boucle de phase asservie comporte des moyens de démarrage du calage à la fréquence de résonance à vide sélectionnée.

De façon optionnelle, le système comporte plusieurs dispositifs de lecture destinés à simultanément déterminer les fréquences de résonance des résonateurs
5 sélectionnés.

De façon optionnelle, le système comporte en outre des moyens de sommation des signaux d'excitation fournis par les dispositifs de lecture, afin de fournir un signal total d'excitation aux entrées des résonateurs électromécaniques.

De façon optionnelle, les résonateurs électromécaniques sont des
10 résonateurs MEMS ou bien des résonateurs NEMS.

De façon optionnelle, les résonateurs électromécaniques sont des résonateurs NEMS gravés sur une même puce de silicium.

Il est également proposé un procédé de fabrication d'un système tel que défini précédemment, comportant, pour le dimensionnement des résonateurs
15 électromécaniques :

- déterminer, pour chaque résonateur, un intervalle de variation maximale attendue de sa fréquence de résonance autour de sa fréquence de résonance à vide, et
- choisir des structures mécaniques des résonateurs définissant des
20 fréquences de résonance à vide suffisamment écartées les unes des autres pour que les intervalles déterminés ne se chevauchent pas.

Il est également proposé un procédé de lecture d'au moins deux résonateurs électromécaniques comportant chacun une structure mécanique définissant une fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs étant
25 différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres, et présentant chacun une fréquence de résonance variant autour de la fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur étant muni d'une entrée destinée à recevoir un signal d'excitation et d'une sortie pour fournir, en réponse au signal d'excitation,
30 un signal de sortie, le signal de sortie présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur électromécanique, le procédé utilisant un dispositif de lecture comportant une mémoire dans laquelle est enregistrée, pour chaque

résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur, et comportant :

- sélectionner, parmi les résonateurs, un ou plusieurs résonateurs à lire,
- 5 - récupérer, dans ladite mémoire, l'information de résonance à vide de chaque résonateur sélectionné pour lecture,
- appliquer un signal d'excitation (e) aux résonateurs et déterminer la fréquence de résonance de chaque résonateur sélectionné pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture à
- 10 partir de l'information de résonance à vide de ce résonateur,
- déterminer, pour chaque résonateur sélectionné, la grandeur physique à partir de la fréquence de résonance déterminée et de la fréquence de résonance à vide du résonateur.

De façon optionnelle, le procédé comporte en outre, avant d'appliquer le

15 signal d'excitation aux résonateurs :

- déterminer les fréquences de résonance à vide des résonateurs,
- pour chaque résonateur, déterminer l'information de résonance à vide de ce résonateur à partir de sa fréquence de résonance à vide,
- enregistrer les informations de résonance à vide déterminées dans
- 20 ladite mémoire.

L'invention sera mieux comprise à l'aide de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple et faite en se référant aux dessins annexés dans lesquels :

- la figure 1 est un schéma simplifié d'un premier système électromécanique de mesure mettant en œuvre l'invention,
- 25 - la figure 2 est un schéma simplifié d'un réseau de résonateurs électromécaniques du système de la figure 1,
- la figure 3 est une photographie d'un résonateur électromécanique du réseau de la figure 2,
- 30 - la figure 4 est un schéma simplifié des connexions des résonateurs électromécaniques du réseau de la figure 2,
- les figures 5 à 14 sont des graphes illustrant des caractéristiques du réseau de résonateurs électromécaniques de la figure 2.

- la figure 15 est un schéma simplifié d'un deuxième système électromécanique de mesure mettant en œuvre l'invention,
- la figure 16 est un schéma simplifié d'un réseau de résonateurs électromécaniques pouvant être utilisé dans le système de la figure 1 ou de la figure 15,
- la figure 17 est un schéma simplifié d'un réseau de résonateurs électromécaniques pouvant être utilisé dans le système de la figure 1 ou de la figure 15,
- la figure 18 est un schéma simplifié d'un troisième système électromécanique de mesure mettant en œuvre l'invention, et
- la figure 19 est un schéma simplifié d'un quatrième système électromécanique de mesure mettant en œuvre l'invention.

En référence à la figure 1, un exemple de système électromécanique de mesure 100 mettant en œuvre l'invention comporte tout d'abord un réseau de résonateurs électromécaniques $102_1 \dots 102_N$. Dans l'exemple décrit, il s'agit de résonateurs NEMS.

Chaque résonateur NEMS $102_1 \dots 102_N$ est munie d'une entrée d'excitation $104_1 \dots 104_N$ et d'une sortie $106_1 \dots 106_N$. Chaque résonateur NEMS $102_1 \dots 102_N$ est conçu pour fournir un signal de sortie $s_1 \dots s_N$ sur sa sortie $106_1 \dots 106_N$ en réponse à un signal d'excitation e appliqué sur son entrée d'excitation $104_1 \dots 104_N$. Chaque résonateur NEMS $102_1 \dots 102_N$ présente en outre une fréquence de résonance $F_1 \dots F_N$ variant autour d'une fréquence de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ en fonction d'une grandeur physique à mesurer. Ainsi, pour chaque résonateur NEMS $102_1 \dots 102_N$, le signal de sortie $s_1 \dots s_N$ correspond au signal d'excitation qui lui est appliqué, amplifié de manière importante autour de la fréquence de résonance $F_1 \dots F_N$. Les fréquences de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ sont différentes les unes des autres. « différentes » signifie que chaque fréquence de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ est espacée de sa voisine inférieure d'au moins 1% de sa valeur. Par exemple, si un résonateur électromécanique présente une fréquence de résonance à vide F^*_i de 1 MHz, l'écart avec la fréquence de résonance à vide précédente F^*_{i-1} est d'au moins 10 kHz.

Le système 100 comporte en outre un dispositif 108 de sommation des signaux de sortie $s_1 \dots s_N$ en un signal total de sortie s .

Le système 100 comporte en outre un dispositif 110 de lecture des résonateurs NEMS $102_1 \dots 102_N$, conçu pour sélectivement déterminer les fréquences de résonance $F_1 \dots F_N$ des MEMS $102_1 \dots 102_N$ à partir du signal total de sortie s.

Dans l'exemple décrit, le dispositif de lecture 110 est conçu pour fournir le signal d'excitation e et il est connecté à toutes les entrées d'excitation $104_1 \dots 104_N$, afin de fournir le signal d'excitation e sur toutes les entrées d'excitation $104_1 \dots 104_N$ en même temps

Dans l'exemple décrit, le dispositif de lecture 110 comporte un circuit de boucle à phase asservie 112 conçu pour caler la fréquence F du signal d'excitation e sur la fréquence d'un pic de résonance du signal total de sortie s et pour fournir, en tant que fréquence de résonance déterminée, la fréquence calée.

A cet effet, le circuit à boucle de phase asservie 112 comporte un oscillateur contrôlé en tension 114 qui est contrôlé par une tension F et connecté aux entrées $104_1 \dots 104_N$ des résonateurs NEMS $102_1 \dots 102_N$ pour leur fournir le signal d'excitation e qui est périodique et monofréquentiel de fréquence correspondant à la tension F. Dans la suite de la description, la tension F sera confondue avec la fréquence du signal d'excitation e.

Le circuit à boucle de phase asservie 112 comporte en outre un comparateur de phase 116 connecté au dispositif de sommation 108 pour recevoir le signal total de sortie s et conçu pour déterminer et fournir un déphasage $d\Phi$ entre le signal total de sortie s et le signal d'excitation e.

Le circuit à boucle de phase asservie 112 comporte en outre un contrôleur 118 connecté au comparateur de phase 116 et conçu pour déterminer et fournir la tension F à l'oscillateur contrôlé en tension 114 à partir du déphasage $d\Phi$.

Le dispositif de lecture 110 comporte en outre une mémoire 120 dans laquelle sont enregistrés, d'une part, les fréquences de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ des résonateurs NEMS $102_1 \dots 102_N$ et d'autre part, un déphasage initial $d\Phi_1 \dots d\Phi_N$ pour chaque résonateur NEMS $102_1 \dots 102_N$.

Le dispositif de lecture 110 comporte en outre des moyens 122 de sélection de chacune des fréquences de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ enregistrées et de chacun des déphasages initiaux $d\Phi_1 \dots d\Phi_N$ enregistrés.

En outre, le circuit à boucle de phase asservie 112 comporte des moyens 124 de démarrage du calage à la fréquence de résonance à vide et au déphasage initial sélectionnés par les moyens 122.

En référence à la figure 2, dans l'exemple décrit, le réseau de résonateurs NEMS 102₁...102_N est constitué de NEMS 102₁...102_N à actionnement capacitif et détection piézorésistive et gravés sur une même puce de silicium 202. Les résonateurs NEMS 102₁...102_N sont par exemple organisés en une matrice de IxJ=N résonateurs NEMS.

En référence à la figure 3, chaque résonateur NEMS du réseau comporte une poutre 302 présentant une première extrémité encastree 304 et une seconde extrémité libre 306. Chaque résonateur NEMS comporte en outre, à proximité de l'extrémité encastree 304, deux jauges de contrainte 308, 310 en matériau piézorésistif disposées de part et d'autre de la poutre 302. Chaque résonateur NEMS comporte en outre deux électrodes 312, 314 d'actionnement de la poutre 302, disposées de part et d'autre de cette dernière. De tels résonateurs NEMS ont pour but de mesurer le poids d'un gaz ambiant et sont capables de mesurer des ajouts de masse de l'ordre de 10⁻²¹ grammes soit 1 zeptogramme.

En référence à la figure 4, les deux jauges de contrainte 308, 310 des résonateurs NEMS 102₁...102_N sont connectées respectivement à des potentiels constants E et -E. En outre, les extrémités encastrees 304 des poutres des résonateurs NEMS fournissent les signaux de sortie s₁...s_N et sont toutes connectées par des connexions à un même nœud 402 fournissant le signal total de sortie s, et définissant ainsi un unique bus de transfert d'informations. Ces connexions et ce nœud 402 forment ainsi les moyens de sommation 108. Par ailleurs, les deux électrodes 312, 314 des résonateurs NEMS 102₁...102_N sont connectées respectivement ensemble et reçoivent respectivement le signal d'excitation e et son opposée -e. A nouveau, cette configuration définit un seul bus d'excitation.

Dans l'exemple décrit, les poutres 302₁...302_N ont des longueurs L₁...L_N différentes les unes des autres, leurs autres caractéristiques géométriques étant identiques. Or, la fréquence de résonance à vide F^{*}_n (n = 1...N) de chaque résonateur NEMS 102₁...102_N est définie de la manière suivante :

$$F_n^* = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho s}} \cdot \left(\frac{2.1178}{L_n} \right)^2 \text{ avec } I = \frac{w^3 e}{12} \text{ et } s = w \cdot e,$$

où E est le module de Young du matériau constituant le résonateur NEMS, ' ρ ' sa masse volumique, I son moment d'inertie du résonateur, s sa section, w sa largeur vibrante, e son épaisseur.

Ainsi, les résonateurs NEMS $102_1 \dots 102_N$ présentent bien des fréquences de
5 résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ différentes les unes des autres.

Le dimensionnement des résonateurs NEMS $102_1 \dots 102_N$ est réalisé en déterminant, pour chaque résonateur NEMS, un intervalle de variation maximale de fréquence de résonance attendue et en choisissant des structures mécaniques (dans l'exemple décrit, des longueurs de poutre) définissant des fréquences de résonance
10 à vide suffisamment écartées les unes des autres pour que les intervalles déterminés ne se chevauchent pas. Des marges supplémentaires sont en outre de préférence prises pour tenir compte de possibles dispersions de fabrication.

Avec un tel dimensionnement, il devient possible de séparer convenablement les informations des NEMS résonateurs $102_1 \dots 102_N$ du réseau.

15 Les figures 5 à 9 illustrent le cas de quatorze résonateurs NEMS dont la longueur des poutres varie de 4.2 mm à 5.5 μ m par pas de 100 nm, et avec $w = 300$ nm et $e = 160$ nm.

La figure 5 illustre les fréquences de résonance à vide (« resonant frequency ») en fonction de la longueur de la poutre (« beam length »).

20 La figure 6 illustre la largeur du canal d'écoute (« channel frequency width »), c'est-à-dire l'écart entre deux fréquences de résonance successives en fonction du résonateur NEMS considéré (« NEMS # »).

La figure 7 illustre la sensibilité (« sensivity ») en hertz par zeptogramme de chaque résonateur NEMS (« NEMS # »), dans le cas où ces derniers sont utilisés en
25 tant que capteurs de masse.

La figure 8 illustre la bande passante (« bandwidth ») pour chaque résonateur NEMS (« NEMS # »), la bande passante étant définie par F^*/Q , où F^* est la fréquence de résonance à vide du résonateur NEMS et Q un facteur de qualité du résonateur NEMS.

30 La figure 9 illustre diagramme de Bode (« Bode diagram ») de ce réseau de quatorze résonateurs NEMS, c'est-à-dire l'amplitude spectrale (« magnitude ») et la phase spectrale (« phase ») en fonction de la fréquence (« frequency »).

Les figures 10 à 14 sont des figures identiques aux figures 5 à 9 dans le cas de quatorze résonateurs NEMS dont la longueur des poutres varie de 4.5 mm à 5.2 μ m par pas de 60 nm, et avec $w = 300$ nm et $e = 160$ nm.

On va à présent décrire le fonctionnement du système 100.

5 Au cours d'une opération de calibration, les fréquences de résonance à vide $F^*_1 \dots F^*_N$ et les déphasages initiaux $d\Phi_1 \dots d\Phi_N$ sont déterminés par exemple en balayant en boucle ouverte l'espace des fréquences avec l'oscillateur contrôlé en tension 114. Ces données sont ensuite enregistrées dans la mémoire 120.

10 En fonctionnement, au cours d'une opération de lecture du résonateur NEMS 102_n, les moyens de sélection 122 sélectionnent la fréquence de résonance à vide F^*_n et le déphasage initial $d\Phi_n$ correspondant au résonateur NEMS 102_n dont la lecture est souhaitée. Les moyens de démarrage 124 injectent alors ces valeurs dans la boucle de phase asservie 112, de manière à assurer l'accrochage de la boucle de phase asservie 112 à la fréquence de résonance du résonateur NEMS 102_n. Ainsi,
15 au bout d'un temps de calage généralement de l'ordre de 50 μ s, la fréquence calée F correspond à la fréquence de résonance du résonateur NEMS 102_n.

L'opération de lecture est alors répétée pour les autres résonateurs NEMS, ce qui permet de tous les lire un par un.

20 Par la suite, la grandeur physique dont la mesure est recherchée par la lecture du résonateur électromécanique, est déterminée à partir de la fréquence de résonance et de la fréquence de résonance à vide du résonateur électromécanique, par exemple à partir de la différence entre sa fréquence de résonance et sa fréquence de résonance à vide.

25 En référence à la figure 15, un second exemple de système électromécanique de mesure 1500 mettant en œuvre l'invention diffère de celui de la figure 1 en particulier par le fait qu'il comporte plusieurs dispositifs de lecture 1502₁...1502_M, chacun identique au dispositif de lecture 110 de la figure 1 et conçu pour fournir un signal d'excitation $e_1 \dots e_M$ respectif. Les éléments de chaque dispositif de lecture 1502₁...1502_M portent les mêmes références que le dispositif de lecture 110, avec en
30 outre un indice 1...M indiquant le dispositif de lecture 1502₁...1502_M auquel ils appartiennent.

Le système 1500 comporte en outre des moyens 1504 de sommation des signaux d'excitation $e_1 \dots e_M$ conçus pour fournir un signal total d'excitation e appliqué

aux entrées $104_1...104_N$ des résonateurs NEMS $102_1...102_N$. Ainsi, le signal d'excitation $e_1...e_M$ de chaque dispositif de lecture $1502_1...1502_M$ est appliqué aux entrées $104_1...104_N$ des MEMS $102_1...102_N$.

En outre, les moyens de sélection 122 de la figure 1 sont remplacés par des
 5 moyens de sélection 1506 conçu pour sélectionner, pour chacun des dispositifs de lecture $1502_1...1502_M$, chacune des fréquences de résonance à vide $F^*_1...F^*_N$ enregistrées et de chacun des déphasages initiaux $d\Phi_1...d\Phi_N$ enregistrés, de sorte que chacun des moyens $124_1...124_M$ soit apte à démarrer le calage à la fréquence de résonance à vide et au déphasage initial sélectionnés pour le dispositif de lecture
 10 $1502_1...1502_M$ correspondant.

Sur la figure 15, chaque dispositif de lecture $1502_1...1502_M$ comporte sa mémoire $120_1...120_M$. Cependant, ces dernières pourraient bien sûr être remplacées par une seule mémoire 120, commune à tous les dispositifs de lecture $1502_1...1502_M$.

15 Il est ainsi possible de lire jusqu'à M des résonateurs NEMS $102_1...102_N$ en même temps.

On va à présent décrire le fonctionnement du système 1500.

Au cours d'une opération de calibration, les fréquences de résonance à vide $F^*_1...F^*_N$ et les déphasages initiaux $d\Phi_1...d\Phi_N$ sont déterminés par exemple en
 20 balayant en boucle ouverte l'espace des fréquences avec l'un des oscillateurs contrôlés en tension 114_m . Ces données sont ensuite enregistrées dans la ou les mémoires.

En fonctionnement, au cours d'une opération de lecture, les moyens de sélection 1506 sélectionnent, pour chacun des M dispositifs de lecture $1502_1...1502_M$,
 25 une fréquence de résonance à vide F^*_n et un déphasage initial $d\Phi_n$ correspondant au résonateur NEMS 102_n dont la lecture est souhaitée par le dispositif de lecture considéré. Les moyens de démarrage $124_1...124_M$ de chaque dispositif de lecture $1502_1...1502_M$ injectent alors ces valeurs dans la boucle de phase asservie $112_1...112_M$ correspondante, de manière à assurer l'accrochage de la boucle de
 30 phase asservie $112_1...112_M$ à la fréquence de résonance du résonateur NEMS 102_n .

Les moyens de sommation 1504 fournissent alors le signal d'excitation e, de sorte que chaque résonateur NEMS $102_1...102_N$ reçoit chacun des signaux d'excitation $e_1...e_M$. Ainsi, chacun des résonateurs NEMS dont la fréquence de

résonance est proche de la fréquence de l'un des signaux d'excitation $e_1 \dots e_M$ fournit un signal de sortie significatif, les signaux de sortie des autres résonateurs NEMS étant négligeables.

Ainsi, au bout d'un temps de calage généralement de l'ordre de 50 μ s, les
5 fréquences calées $F_1 \dots F_M$ des dispositifs de lectures 1502₁...1502_M correspondent aux fréquences de résonance des résonateurs NEMS dont la lecture est souhaitée, c'est-à-dire ceux dont la fréquence de résonance à vide F_n^* et le déphasage initial $d\Phi_n$ ont été sélectionnés par les moyens 1504

Ainsi, plusieurs résonateurs NEMS sont lus en même temps.

10 L'opération de lecture est alors répétée pour d'autres résonateurs NEMS du réseau, ce qui permet de tous les lire par groupe de M.

Par la suite, la grandeur physique est déterminée à partir de la fréquence de résonance et de la fréquence de résonance à vide de chaque résonateur électromécanique lu, par exemple à partir de la différence entre la fréquence de
15 résonance et la fréquence de résonance à vide.

En référence à la figure 16, dans une variante de réalisation, les résonateurs NEMS 102₁...102_N à actionnement capacitif et détection piézorésistive peuvent être remplacés par des résonateurs NEMS à actionnement capacitif et détection capacitive. Chacun des résonateurs NEMS comporte une capacité présentant deux
20 électrodes (appelées respectivement électrode haute et électrode basse) et une poutre disposée entre les électrodes et maintenue à un potentiel continu. Les électrodes hautes sont reliées entre elles et les électrodes basses sont reliées entre elles. Le signal d'excitation e est la tension appliquée sur les électrodes hautes, tandis que le signal de sortie s est le courant induit.

25 En référence à la figure 17, dans une variante de réalisation, les résonateurs NEMS 102₁...102_N à actionnement capacitif et détection piézorésistive peuvent être remplacés par des résonateurs NEMS à actionnement thermo-élastique et détection piézorésistive. Dans ce cas, chaque résonateur NEMS comporte une résistance variable présentant deux bornes (appelées respectivement électrode haute et
30 électrode basse). Les électrodes hautes sont reliées entre elles, les électrodes basses sont reliées entre elles. Le signal d'excitation e est la tension appliquée entre les bornes hautes et basses, tandis que le signal de sortie est le courant induit.

En référence à la figure 18, un troisième système électromécanique de mesure 1800 mettant en œuvre l'invention diffère de celui de la figure 1 en particulier par le fait que le dispositif de lecture, à présent numéroté 1802, comporte plusieurs boucles d'auto-oscillation 1803. Le dispositif de lecture 1802 comporte en particulier

5 un démultiplexeur 1804 recevant le signal total de sortie s , extrayant du signal total de sortie s un nombre M de signaux de sortie $s_1...s_M$. Le démultiplexeur 1804 est en outre conçu pour analyser les signaux de sortie extraits $s_1...s_M$, afin de déterminer leurs fréquences de résonance $F_1...F_M$. Le dispositif comporte des moyens de commande (non représentés) conçus pour indiquer au démultiplexeur 1804 quels

10 signaux doivent être extraits, ces signaux correspondant aux résonateurs électromécaniques dont la lecture est souhaitée. Pour permettre l'extraction des signaux par le démultiplexeur, on pourra par exemple utiliser, pour chaque résonateur sélectionné pour lecture, une information correspondant à une bande passante s'étendant autour de la fréquence de résonance à vide du résonateur

15 considéré et enregistrée dans une mémoire (non représentée). Le dispositif de lecture 1802 comporte en outre M déphaseurs 1806₁...1806_M, chacun conçu pour déphaser un signal de sortie extrait respectif $s^*_1...s^*_M$, afin d'obtenir un déphasage entrée/sortie nul pour la boucle d'auto-oscillation correspondante. Le dispositif de lecture 1802 comporte en outre un multiplexeur 1808 conçu pour additionner les

20 signaux de sortie extraits $s^*_1...s^*_M$, après qu'ils aient été déphasés, afin de fournir un signal additionné, noté e^* . Le dispositif de lecture 1802 comporte en outre un amplificateur 1810 conçu pour recevoir le signal additionné e^* afin de fournir le signal d'excitation e . Le signal d'excitation e et le signal de sortie s comportent ainsi, au

25 bout d'un temps initial de mise en auto-oscillation, M pics de fréquences correspondant aux fréquences de résonance des M résonateurs électromécaniques en cours de lecture.

En référence à la figure 19, un quatrième système électromécanique de mesure 1900 va à présent être décrit. Ce quatrième système électromécanique de mesure 1900 présente de nombreuses similitudes avec celui de la figure 15. En

30 particulier, il emploie plusieurs circuits à boucle de phase asservie pour déterminer les fréquences de résonance des résonateurs sélectionnés pour lecture en partant de leurs fréquences de résonance à vide.

Le système électromécanique de mesure 1900 comporte tout d'abord un réseau de résonateurs électromécaniques portant la référence générale 1902. Dans l'exemple décrit, les résonateurs électromécaniques 1902 sont au nombre de cinquante et sont similaires à ceux représentés sur les figures 3 et 4. Comme indiqué
5 précédemment dans la description de ces figures, le même signal d'excitation e et le même signal de polarisation E sont appliqués à chacun des résonateurs 1902. En outre, les sorties - présentant les signaux de sorties locaux notés $s_1, s_2, s_3, \dots$ sur la figure 4 - de tous les résonateurs 1902 sont reliées ensemble à une sortie commune (portant la référence 402 sur la figure 4) présentant ainsi un signal de sortie total s .
10 Dans l'exemple décrit, le signal total de sortie s est une tension analogique.

Le système électromécanique de mesure 1900 comporte en outre un système de lecture 1904 destiné à "lire" un ou plusieurs résonateurs sélectionnés parmi les résonateurs 1902, c'est-à-dire à déterminer la fréquence de résonance de ce ou ces résonateurs. Dans l'exemple décrit, le système de lecture 1904 est destiné à lire cinq
15 résonateurs à la fois, et comporte de ce fait cinq circuits à boucle de phase asservie.

Le système de lecture 1904 comporte tout d'abord une mémoire 1906 dans laquelle les fréquences de résonance à vide des résonateurs 1902 sont enregistrées.

Le système de lecture 1904 comporte en outre un dispositif de sélection 1908 destiné à sélectionner dans la mémoire 1906, pour chaque résonateur que le
20 système de lecture 1904 est destiné à lire, la fréquence de résonance à vide du résonateur considéré. Dans l'exemple décrit, les fréquences de résonance à vide sélectionnées sont notées $Fs(1) \dots Fs(5)$.

Le système de lecture 1904 comporte en outre un système d'excitation 1910 destiné à fournir le signal d'excitation e à chacun des résonateurs 1902, et en
25 particulier aux résonateurs dont la lecture est souhaitée, à partir, d'une part, de la ou des fréquences de résonance à vide sélectionnées $Fs(1) \dots Fs(5)$ fournies par le dispositif de sélection 1908 et, d'autre part, d'une ou plusieurs corrections de fréquence, notées $cf(1) \dots cf(5)$ et fournies par un système qui sera décrit plus loin. Le système d'excitation 1910 est ainsi configuré à partir de la ou des fréquences de
30 résonances sélectionnées.

Le système d'excitation 1910 comporte en outre un dispositif de correction de fréquence 1912 destiné à fournir, pour chaque résonateur que le système de lecture 1904 est destiné à lire, une fréquence corrigée $fc(1) \dots fc(5)$ à partir, d'une part, de la

fréquence de résonance à vide $F_s(1)...F_s(5)$ fournie par le dispositif de sélection 1908 et, d'autre part, de la correction de fréquence $cf(1)...cf(5)$ pour le résonateur considéré. Dans l'exemple décrit, le dispositif de correction de fréquence 1912 est un additionneur.

5 Le système d'excitation 1910 comporte en outre, pour chaque résonateur destiné à être lu par le système de lecture 1904, un dispositif de génération de signal monofréquentiel 1914(1)...1914(5) destiné à générer un signal d'excitation $e(1)...e(5)$ monofréquentiel de fréquence égale à la fréquence corrigée $fc(1)...fc(5)$ pour le résonateur considéré. Dans l'exemple décrit, les dispositifs de génération de signal
10 monofréquentiel 1914(1)...1914(5) sont des oscillateurs commandés numériquement.

Le système d'excitation 1910 comporte en outre un additionneur 1916 destiné à additionner le ou les signaux d'excitation $e(1)...e(5)$ fournis par le ou les dispositifs de génération de signal monofréquentiel 1914(1)...1914(5) en un signal d'excitation numérique e' .

15 Le système d'excitation 1910 comporte en outre un convertisseur numérique analogique 1918 destiné à convertir le signal d'excitation numérique e' en un signal d'excitation analogique e , ce dernier étant fourni à chacun des résonateurs 1902.

Le système de lecture 1904 comporte en outre un système de correction 1920 destiné à fournir, à partir du signal de sortie total s , pour chaque résonateur destiné à
20 être lu par le système de lecture 1904, la correction de fréquence $cf(1)...cf(5)$ fournie au dispositif de correction de fréquence 1912.

Le système de correction 1920 comporte tout d'abord, pour chaque résonateur destiné à être lu par système de lecture 1904, un dispositif de détermination de déphasage 1922 destiné à déterminer, pour chaque résonateur
25 destiné à être lu par le système de lecture 1904, la phase $\Phi(1)... \Phi(5)$ du signal de sortie local (références $s_1, s_2, s_3, \dots$ sur la figure 4) du résonateur considéré.

Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte tout d'abord un amplificateur faible bruit 1924 destiné à amplifier le signal de sortie total s de manière à fournir un signal de sortie total amplifié S .

30 Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte en outre un convertisseur analogique/numérique 1926 destiné à convertir le signal de sortie total amplifié S en un signal de sortie total amplifié numérique S' .

Le système de correction 1920 comporte en outre une mémoire 1928 dans laquelle sont enregistrées des fréquences $df_1 \dots df_5$, d'un nombre égal au nombre de résonateurs que le système de lecture 1904 est destiné à lire. Les fréquences $df_1 \dots df_5$ sont choisies de manière arbitraire. Cependant, pour un bon fonctionnement du système de lecture 1904, il est nécessaire que l'écart entre les fréquences soit égal à au moins dix fois la fréquence de coupure des filtres 1934 qui seront décrits plus loin. Un tel écart permet par exemple d'éviter un repliement du spectre de fréquence dans la bande de fréquence de travail des filtres 1934. Par exemple, si la fréquence de coupure de ces filtres est de 1 kHz, il est nécessaire que l'écart soit d'au moins 10 kHz. Dans l'exemple décrit, les fréquences enregistrées sont comprises dans l'intervalle s'étendant de 10 kHz à 100 kHz.

Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte en outre, pour chaque résonateur destiné à être lu par le système de lecture 1904, un oscillateur commandé numériquement 1930(1)...1930(5). Ces oscillateurs sont destinés à recevoir des fréquences respectives $df_1 \dots df_5$ enregistrées dans la mémoire 1928 et à fournir chacun deux signaux monofréquentiels en quadrature l'un de l'autre, tous les deux à la fréquence $df_1 \dots df_5$ reçue.

Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte en outre, pour chaque résonateur que le dispositif de lecture 1904 est destiné à lire, un mélangeur 1932(1)...1932(5) destiné à mélanger les signaux en quadrature avec le signal S' .

Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte en outre, pour chaque résonateur que le dispositif de lecture 1904 est destiné à lire, un filtre passe-bas 1934(1)...1934(5) destiné à filtrer les signaux fournis par le mélangeur 1932(1)...1932(5) correspondant. Chaque filtre passe-bas fournit ainsi un signal complexe représentant le signal de sortie du résonateur considéré (les signaux de sortie sont référencés $s_1, s_2, s_3, \dots$ sur la figure 4).

Le dispositif de détermination de déphasage 1922 comporte en outre un dispositif de calcul de phase 1936 destiné à déterminer, pour chaque résonateur que le dispositif de lecture 1904 est destiné à lire, la phase du signal de sortie correspondant à ce résonateur. Dans l'exemple décrit, le dispositif de calcul de phase 1936 est ainsi destiné à fournir cinq phases notées $\Phi(1) \dots \Phi(5)$.

Le système de correction 1920 comporte en outre une mémoire 1938 dans laquelle les phases à la résonance à vide de chaque résonateur sont enregistrées.

Le système de correction 1920 comporte en outre un comparateur 1940 destiné, pour chaque résonateur que le dispositif de lecture 1904 est destiné à lire, à comparer la phase $\Phi(1)...\Phi(5)$ déterminée par le dispositif de détermination de phase 1922, avec la phase à la résonance à vide enregistrée dans la mémoire pour le résonateur considéré et à fournir le déphasage $d_{\Phi(1)}...d_{\Phi(5)}$ résultant de la comparaison. Dans l'exemple décrit, le comparateur 1940 est un soustracteur.

Le système de correction 1920 comporte en outre un échantillonneur 1950 destiné à re-échantillonner les déphasages $d_{\Phi(1)}...d_{\Phi(5)}$ fournis afin de diminuer la fréquence d'échantillonnage, ce qui permet de simplifier les calculs après l'échantillonneur 1950. Dans l'exemple décrit les déphasages $d_{\Phi(1)}...d_{\Phi(5)}$ sont re-échantillonnés à 100 kilohertz. En effet, à cause de l'imprécision des filtres passe-bas 1934(1)...1934(5), une fréquence d'échantillonnage plus grande n'est pas nécessaire.

Le système de correction 1920 comporte en outre, pour chaque résonateur que le dispositif de lecture 1904 est destiné à lire, un filtre de correction 1952(1)...1952(5) destiné à déterminer la ou les corrections de fréquence $cf(1)...cf(5)$. Dans l'exemple décrit, les filtres de correction 1952(1)...1952(5) sont des filtres passe-bas.

Dans le mode de réalisation de la figure 19, le potentiel de polarisation des résonateurs (noté E sur la figure 4 et toujours noté E sur la figure 19) est cette fois variable. Ainsi, le système de lecture 1904 comporte en outre un système de polarisation 1954 destiné à fournir le potentiel de polarisation E.

Dans l'exemple décrit, le système de polarisation 1954 est destiné à fournir le même potentiel de polarisation E à tous les résonateurs 1902, à partir, d'une part, de la ou des fréquences corrigées $fc(1)...fc(5)$ et, d'autre part, des fréquences $df1...df5$.

Le système de polarisation 1954 comporte tout d'abord un comparateur 1956 destiné à comparer, pour chaque résonateur que le système de lecture 1904 est destiné à lire, la fréquence corrigée et la fréquence $df1...df5$ qui correspondent au résonateur considéré, et à fournir le résultat de cette comparaison, appelé fréquence corrigée décalée et notée $fcd(1)...fcd(5)$.

Le système de polarisation 1954 comporte en outre, pour chaque résonateur que le système de lecture 1904 est destiné à lire, un générateur 1958(1)...1958(5)

d'un signal local de polarisation $E(1)...E(5)$ présentant une fréquence égale à la fréquence corrigées décalée $fcd(1)...fcd(5)$ du résonateur considéré.

Le système de polarisation 1954 comporte en outre un additionneur 1960 destiné à additionner le ou les signaux locaux de polarisation $E(1)...E(5)$ pour fournir
5 un signal de polarisation E' sous forme numérique.

Le système de polarisation 1954 comporte en outre un convertisseur numérique/analogique 1962 destiné à convertir le signal de polarisation numérique E' en signal de polarisation analogique E qui est appliqué à chacun des résonateurs 1902.

10 Tous les éléments décrits précédemment, à l'exception des résonateurs 1902 et de l'amplificateur faible bruit 1924 sont, dans l'exemple décrit, implémentés dans un réseau de portes programmables in situ (de l'anglais "field-programmable gate array" ou FPGA).

Par ailleurs, on remarquera que le système de lecture 1904 peut être
15 décomposé en plusieurs dispositifs de lecture (cinq dans l'exemple décrit), chacun destiné à lire un résonateur en fournissant le signal d'excitation $e(1)...e(5)$ respectif, et chacun comportant une boucle à phase asservie. Par exemple, le premier dispositif de lecture comporte les éléments suivants : 1924, 1926, 1930(1), 1932(1), 1934(1), 1936, 1938, 1940, 1950, 1952(1), 1906, 1908, 1912, 1914(1), 1928, 1956,
20 1958(1), 1960 et 1962. De la même manière que dans le système de la figure 15, les signaux d'excitation $e(1)...e(5)$ sont additionnés dans l'additionneur 1916 pour fournir le signal d'excitation e .

Un exemple de fonctionnement du système électromécanique de mesure 1900 pour la lecture de cinq résonateurs va à présent être décrit.

25 Les résonateurs sont sous contrainte de sorte que leur fréquence de résonance est décalée de leur fréquence de résonance à vide.

Le système de lecture 1904 sélectionne cinq résonateurs à lire.

Le dispositif de sélection 1908 fournit les cinq fréquences de résonance à vide $Fs(1)...Fs(5)$ des cinq résonateurs sélectionnés.

30 Au démarrage de la lecture, les corrections de fréquence $cf(1)...cf(5)$ sont nulles. Ainsi, les fréquences corrigées $fc(1)...fc(5)$ sont égales aux fréquences de résonance à vide $Fs(1)...Fs(5)$ et le signal d'excitation e comporte les cinq fréquences de résonance à vide $Fs(1)...Fs(5)$ des cinq résonateurs lus.

Le système de correction 1920 détermine des corrections de fréquence $cf(1)....cf(5)$ de sorte que les fréquences corrigées $fc(1)...fc(5)$ se rapprochent respectivement des fréquences de résonance des résonateurs lus.

Le système d'excitation 1910 fournit alors un nouveau signal d'excitation e
5 présentant les fréquences corrigées.

La boucle est alors de nouveau parcourue jusqu'à ce que les fréquences corrigées deviennent respectivement égales ou presque égales aux fréquences de résonance des résonateurs lus. Dans l'exemple décrit, cette convergence prend moins d'une milliseconde. Ainsi, au bout d'une milliseconde, le système de lecture
10 1904 sélectionne cinq nouveaux résonateurs à lire. Dans l'exemple décrit, tous les résonateurs peuvent donc être lus en 10 millisecondes.

Le fait d'utiliser des informations de résonance à vide (comme les fréquences de résonance à vide ou les bandes passantes autour des fréquences de résonance à vide) permet d'accélérer la lecture en permettant de démarrer la recherche de la
15 fréquence de résonance là où elle a le plus de chance de se trouver, c'est-à-dire autour de la fréquence de résonance à vide. Cette caractéristique présente donc des avantages par rapport à un simple balayage « quasi-continu » sur une large plage de fréquences.

En outre, les modes de réalisation à base de boucle de phase asservie avec
20 détection « automatique » du déphasage donnant la fréquence de mesure recherchée sont intéressants car ils permettent d'augmenter de façon significative la vitesse de mesure, en particulier par rapport à un système en boucle ouverte.

En outre, l'utilisation de plusieurs dispositifs de lecture en parallèle pour paralléliser les lectures à différentes fréquences permet également d'accélérer la
25 vitesse de lecture.

Il apparaît clairement qu'un système électromécanique de mesure tel que ceux décrits précédemment permet de réduire le nombre de dispositifs de lecture nécessaires, ainsi que la complexité des interconnexions.

On notera par ailleurs que l'invention n'est pas limitée aux modes de
30 réalisation décrits précédemment. Il apparaîtra en effet à l'homme de l'art que diverses modifications peuvent être apportées aux modes de réalisation décrits ci-dessus, à la lumière de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

En particulier, d'autres résonateurs électromécaniques que des résonateurs NEMS ou des résonateurs MEMS pourraient être utilisés.

En outre, l'initialisation d'un dispositif de lecture pour être faite, non pas à la fréquence de résonance à vide du résonateur électromécanique dont la lecture est
5 souhaitée, mais à une fréquence proche déterminée en ajoutant (ou soustrayant) un terme d'adaptation à la fréquence à vide du résonateur électromécanique. Ce terme d'adaptation tient par exemple compte d'une dérive de la fréquence de résonance à vide dans le temps, ou bien d'une dérive en température, ou bien, dans le cas de l'exemple de résonateur électromécanique décrit sur la figure 3, à la présence d'une
10 masse supplémentaire s'ajoutant à la masse déjà présente.

En outre, les moyens de sommation pourraient être réalisés par un circuit électronique de sommation, connu en soi.

En outre, les moyens de sommation pourraient être remplacés par un commutateur recevant en entrée tous les signaux de sortie et fournissant en sortie,
15 au ou aux dispositifs de lecture, sélectivement un ou plusieurs de ces signaux de sortie correspondant au ou aux résonateurs électromécaniques dont la lecture est souhaitée. Dans les revendications qui suivent, les termes utilisés ne doivent pas être interprétés comme limitant les revendications aux modes de réalisation exposés dans la présente description, mais doivent être interprétés pour y inclure tous les
20 équivalents que les revendications visent à couvrir du fait de leur formulation et dont la prévision est à la portée de l'homme de l'art en appliquant ses connaissances générales à la mise en œuvre de l'enseignement qui vient de lui être divulgué.

En outre, bien que les exemples de dispositifs de lecture décrits précédemment soient des dispositifs en boucle fermée, ou pourrait également utiliser
25 des dispositifs de lecture en boucle ouverte. Dans ce cas également, la connaissance des fréquences de résonance à vide enregistrées dans une mémoire permettrait de réaliser une recherche plus rapide de la fréquence de résonance des résonateurs.

REVENDICATIONS

1. Système de mesure à résonateurs électromécaniques, comportant :
 - au moins deux résonateurs électromécaniques ($102_1 \dots 102_N$; 1902) présentant chacun une fréquence de résonance variant autour d'une fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902) étant muni :
 - d'une entrée ($104_1 \dots 104_N$) destinée à recevoir un signal d'excitation (e),
 - d'une sortie ($106_1 \dots 106_N$) pour fournir un signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) en réponse au signal d'excitation (e), le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902),
 - et chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902) comportant une structure mécanique définissant sa fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902) étant différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres,
 - au moins un dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) connecté aux entrées des résonateurs et conçu pour fournir un signal d'excitation sur lesdites entrées,
 - une mémoire (120 ; $120_1 \dots 120_M$; 1906) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur,

chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) étant destiné à déterminer la fréquence de résonance d'un ou plusieurs résonateurs sélectionnés pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) à partir de l'information de résonance à vide mémorisée pour chaque résonateur sélectionné,

- 30 le système étant caractérisé en ce que chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) comporte une boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) destinée à recevoir le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) et à fournir le signal d'excitation (e) en fonction du signal de sortie ($s_1 \dots s_N$).

2. Système selon la revendication 1, comportant plusieurs dispositifs de lecture ($1502_1 \dots 1502_M$) destinés à simultanément déterminer les fréquences de résonance des résonateurs sélectionnés.

3. Système selon la revendication 2, comportant en outre des moyens de sommation (1504 ; 1918) des signaux d'excitation ($e_1 \dots e_M$; $e(1) \dots e(5)$) fournis par les dispositifs de lecture, afin de fournir un signal total d'excitation (e) aux entrées ($104_1 \dots 104_N$) des résonateurs électromécaniques ($102_1 \dots 102_N$; 1902).

4. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans lequel, pour chaque résonateur électromécanique ($102_1 \dots 102_N$; 1902), l'entrée ($104_1 \dots 104_N$) et la
10 sortie ($106_1 \dots 106_N$) sont différentes.

5. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, comportant en outre des moyens (108) de sommation des signaux de sortie ($s_1 \dots s_N$) en un signal total de sortie (s).

6. Système selon la revendication 5, dans lequel chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) est conçu pour déterminer, à partir du signal total de sortie (s), la fréquence de résonance d'un seul résonateur ($102_1 \dots 102_N$; 1902) sélectionné.

7. Système selon la revendication 6, dans lequel chaque dispositif de lecture (110 ; $1502_1 \dots 1502_M$; 1802) est conçu pour successivement déterminer, à partir du signal total de sortie (s), la fréquence de résonance de plusieurs résonateurs
20 ($102_1 \dots 102_N$; 1902) sélectionnés.

8. Système selon l'une des revendications 5 à 7, dans lequel les moyens de sommation (108) comportent un nœud auquel les sorties ($106_1 \dots 106_N$) des résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902) sont connectées.

9. Système selon l'une quelconque des revendications 5 à 8, dans lequel, pour chaque résonateur, l'information de résonance à vide est une bande passante s'étendant autour de la fréquence de résonance à vide, dans lequel chaque dispositif de lecture (1802) comporte au moins une boucle d'auto-oscillation (1803) comportant un démultiplexeur (1804) destiné à extraire, du signal total de sortie (s), chacun des signaux de sortie ($s_1 \dots s_M$) des résonateurs sélectionnés pour lecture, l'extraction étant réalisée,
30 pour chaque résonateur sélectionné pour lecture, dans la bande passante propre à ce résonateur.

10. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans lequel l'information de résonance à vide propre à chaque résonateur est la fréquence de résonance à vide de ce résonateur.

11. Système selon la revendication 10, dans lequel chaque dispositif de lecture (110 ; 1502₁...1502_M) est conçu pour déterminer la fréquence de résonance d'un seul résonateur, comporte des moyens de sélection (122 ; 1508 ; 1908) de la fréquence de résonance à vide du résonateur sélectionné pour lecture, et est conçu pour fournir, au démarrage de la lecture, un signal d'excitation (e ; e₁...e_M ; e(1)...e(5)) monofréquentiel de fréquence égale à la fréquence de résonance à vide sélectionnée.

10 12. Système selon la revendication 10 ou 11 prise ensemble avec la revendication 4, dans lequel chaque dispositif de lecture (110 ; 1502₁...1502_M) comporte un circuit de boucle à phase asservie (112 ; 112₁...112_M) conçu pour caler, après démarrage de la lecture, la fréquence du signal d'excitation (e ; e₁...e_M ; e(1)...e(5)) sur la fréquence d'un pic de résonance du signal total (s) correspondant au résonateur sélectionné pour lecture et pour fournir, en tant que fréquence de résonance déterminée, la fréquence calée.

13. Système selon la revendications 12, dans lequel chaque circuit à boucle de phase asservie (112 ; 112₁...112_M) comporte des moyens (124 ; 124₁...124_M ; 1914(1)...1914(5)) de démarrage du calage à la fréquence de résonance à vide sélectionnée.

20 14. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, dans lequel les résonateurs électromécaniques (102₁...102_N ; 1902) sont des résonateurs MEMS ou bien des résonateurs NEMS.

15. Système selon la revendication 14, dans lequel les résonateurs électromécaniques (102₁...102_N ; 1902) sont des résonateurs NEMS (102₁...102_N) gravés sur une même puce de silicium (202).

16. Procédé de fabrication du système selon l'une quelconque des revendications 1 à 15, comportant, pour le dimensionnement des résonateurs électromécaniques (102₁...102_N ; 1902) :

- déterminer, pour chaque résonateur, un intervalle de variation maximale attendue de sa fréquence de résonance autour de sa fréquence de résonance à vide, et
- 30 - choisir des structures mécaniques des résonateurs définissant des fréquences de résonance à vide suffisamment écartées les unes des autres pour que les intervalles déterminés ne se chevauchent pas.

17. Procédé de lecture d'au moins deux résonateurs électromécaniques (102₁...102_N ; 1902) comportant chacun une structure mécanique définissant une

fréquence de résonance à vide, les structures mécaniques des résonateurs ($102_1 \dots 102_N$) étant différentes les unes des autres de sorte que les fréquences de résonance à vide sont différentes les unes des autres, et présentant chacun une fréquence de résonance variant autour de la fréquence de résonance à vide en fonction d'une grandeur physique à mesurer, chaque résonateur ($102_1 \dots 102_N$) étant muni d'une entrée ($104_1 \dots 104_N$) destinée à recevoir un signal d'excitation (e) et d'une sortie ($106_1 \dots 106_N$) pour fournir, en réponse au signal d'excitation (e), un signal de sortie ($s_1 \dots s_N$), le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) présentant une résonance à la fréquence de résonance du résonateur électromécanique ($102_1 \dots 102_N$), le procédé utilisant un

10 dispositif de lecture comportant une mémoire (120 ; $120_1 \dots 120_M$; 1906) dans laquelle est enregistrée, pour chaque résonateur, une information de résonance à vide relative à la fréquence de résonance à vide du résonateur et une boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) destinée à recevoir le signal de sortie ($s_1 \dots s_N$) et à fournir le signal d'excitation (e) en fonction du signal de sortie ($s_1 \dots s_N$), et comportant :

- sélectionner, parmi les résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902), un ou plusieurs résonateurs à lire,
- récupérer, dans ladite mémoire, l'information de résonance à vide de chaque résonateur sélectionné pour lecture,
- appliquer un signal d'excitation (e) au moyen de la boucle fermée (112 ; $112_1 \dots 112_M$; 1803) aux résonateurs et déterminer la fréquence de
- 20 résonance de chaque résonateur sélectionné pour lecture en configurant au moins un élément du dispositif de lecture à partir de l'information de résonance à vide de ce résonateur,
- déterminer, pour chaque résonateur sélectionné, la grandeur physique à partir de la fréquence de résonance déterminée et de la fréquence de résonance à vide du résonateur.

18. Procédé selon la revendication 17, comportant en outre, avant d'appliquer le signal d'excitation (e) aux résonateurs ($102_1 \dots 102_N$; 1902) :

- déterminer les fréquences de résonance à vide des résonateurs
- 30 ($102_1 \dots 102_N$; 1902),
- pour chaque résonateur, déterminer l'information de résonance à vide de ce résonateur à partir de sa fréquence de résonance à vide,
- enregistrer les informations de résonance à vide déterminées dans ladite mémoire (120 ; $120_1 \dots 120_M$; 1906).

1/7

Figure 1

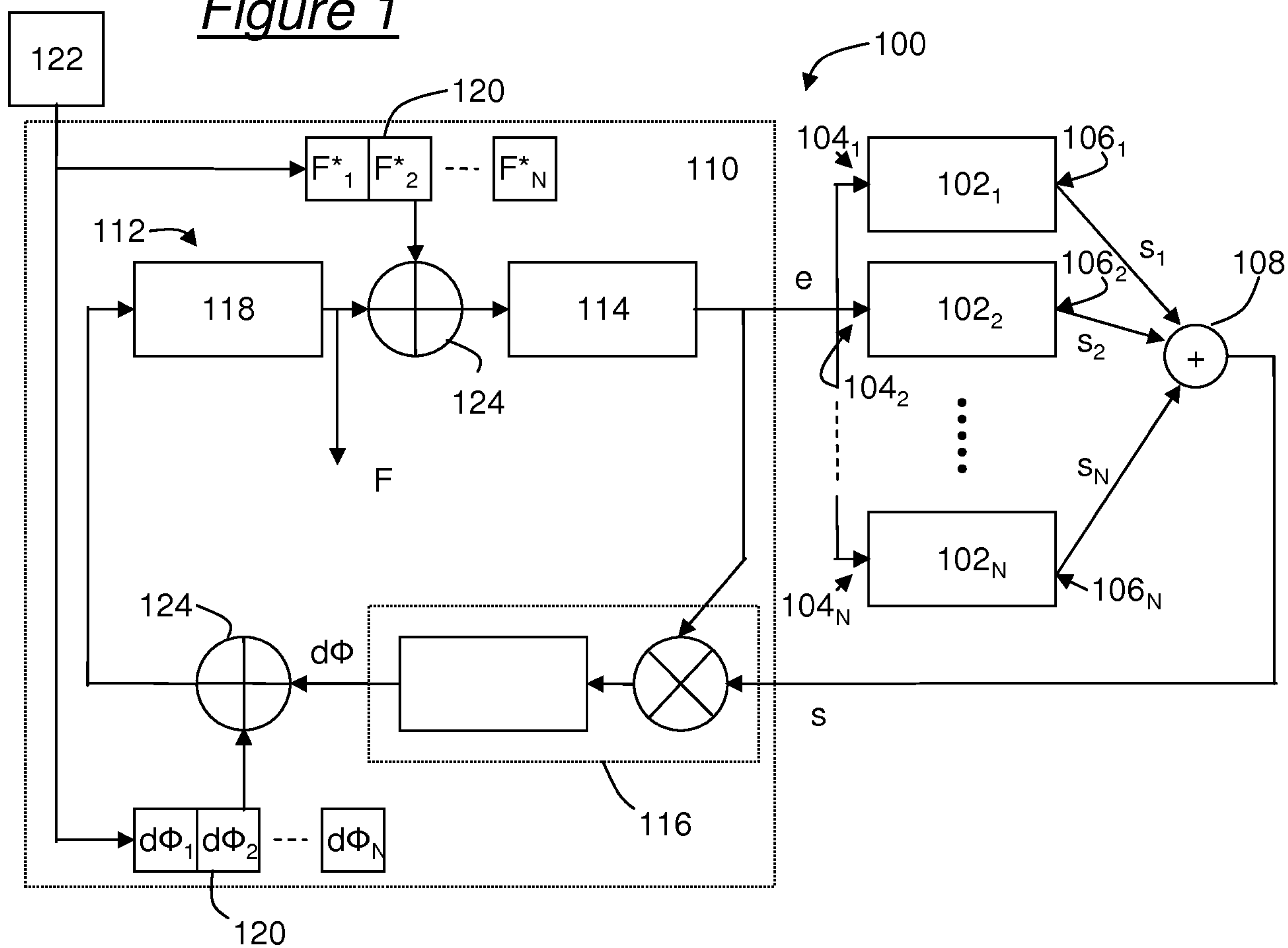
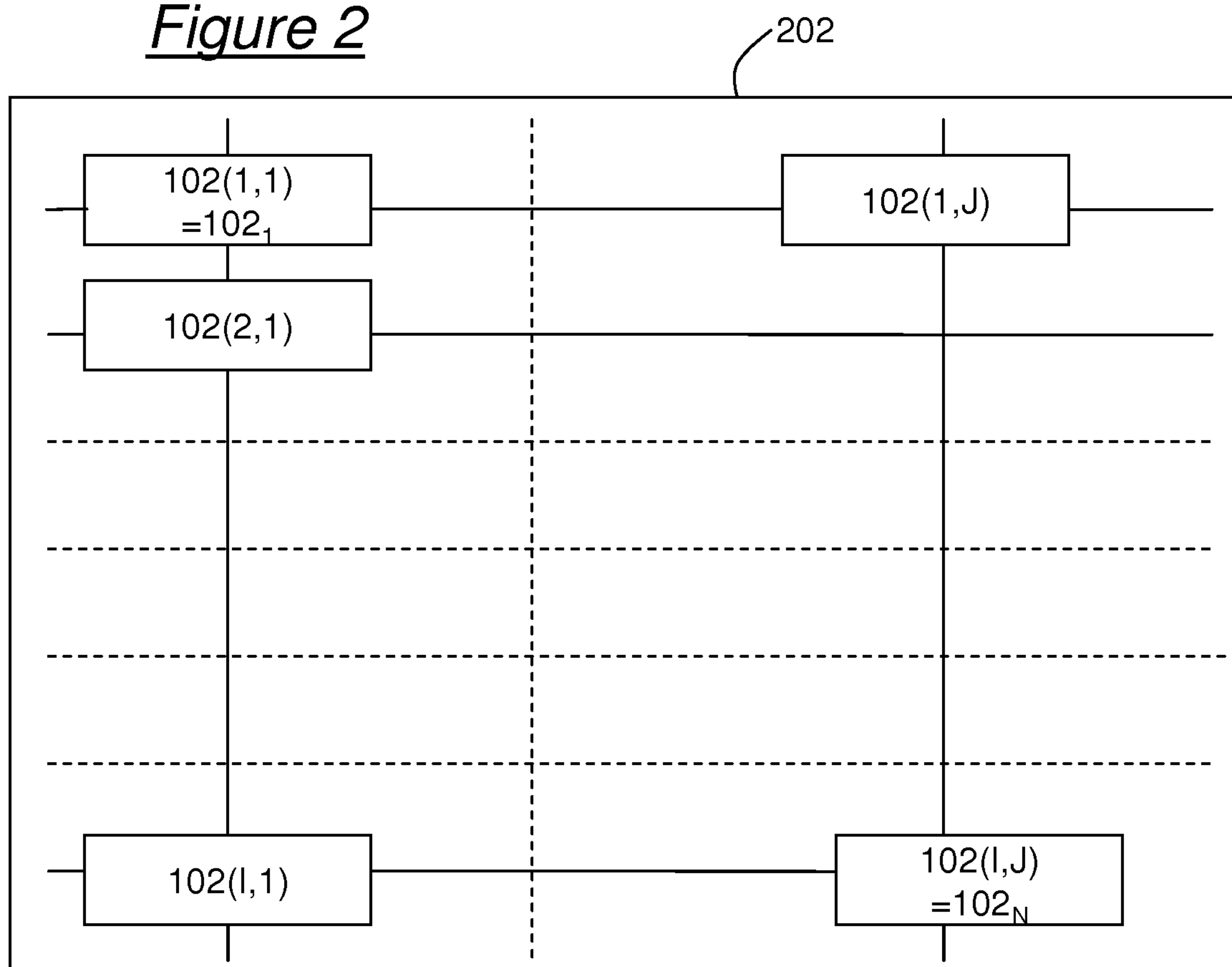
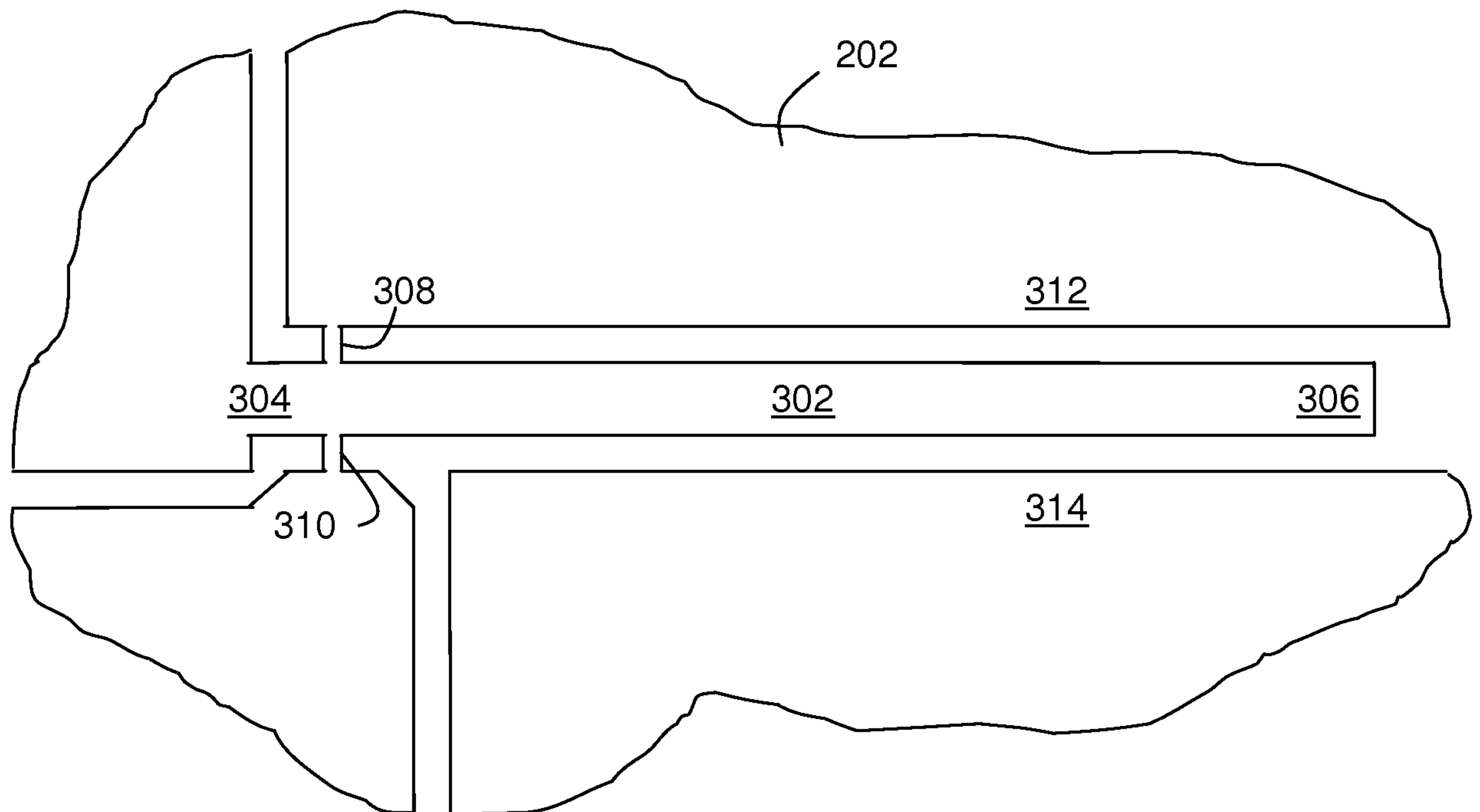
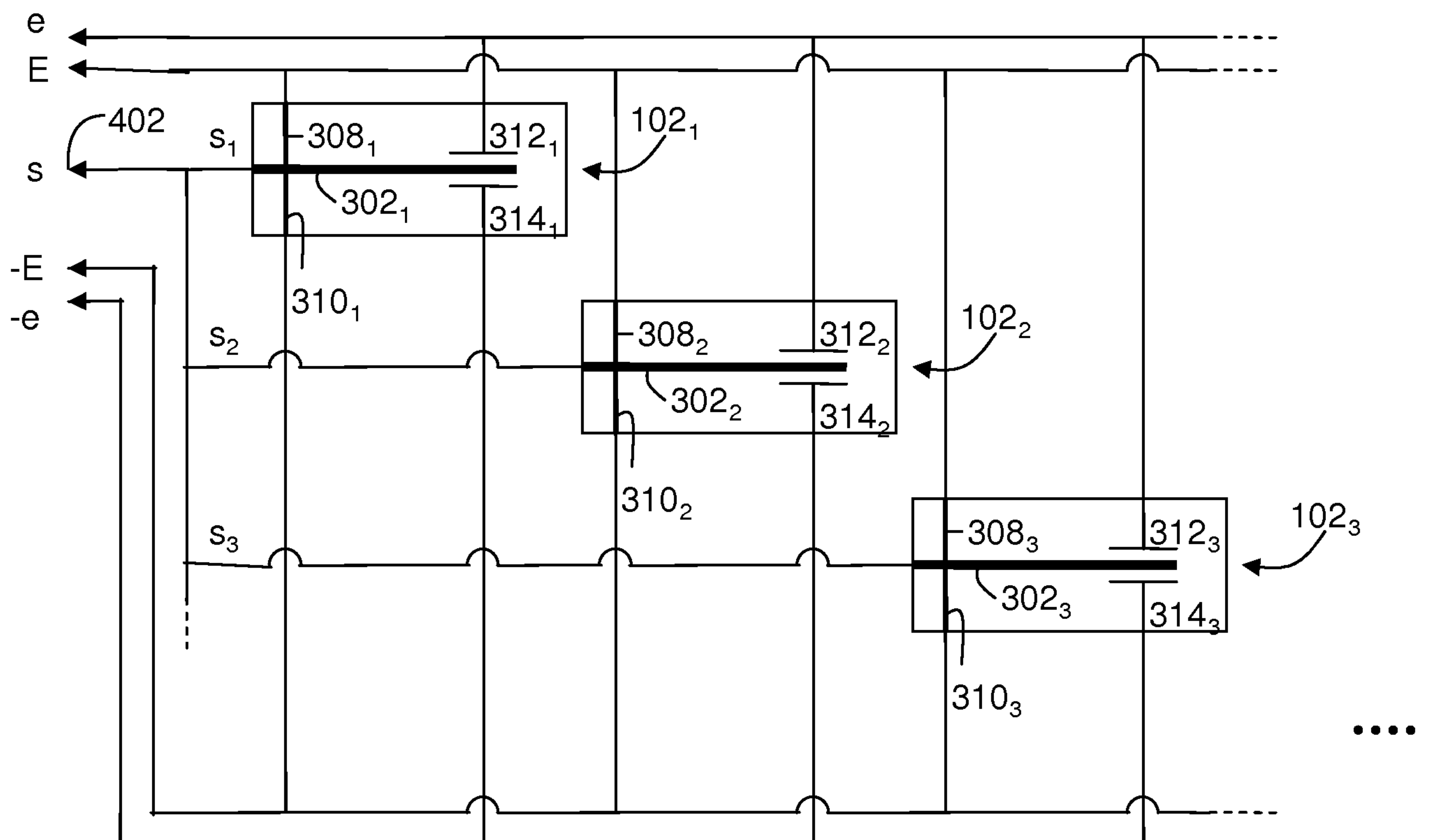


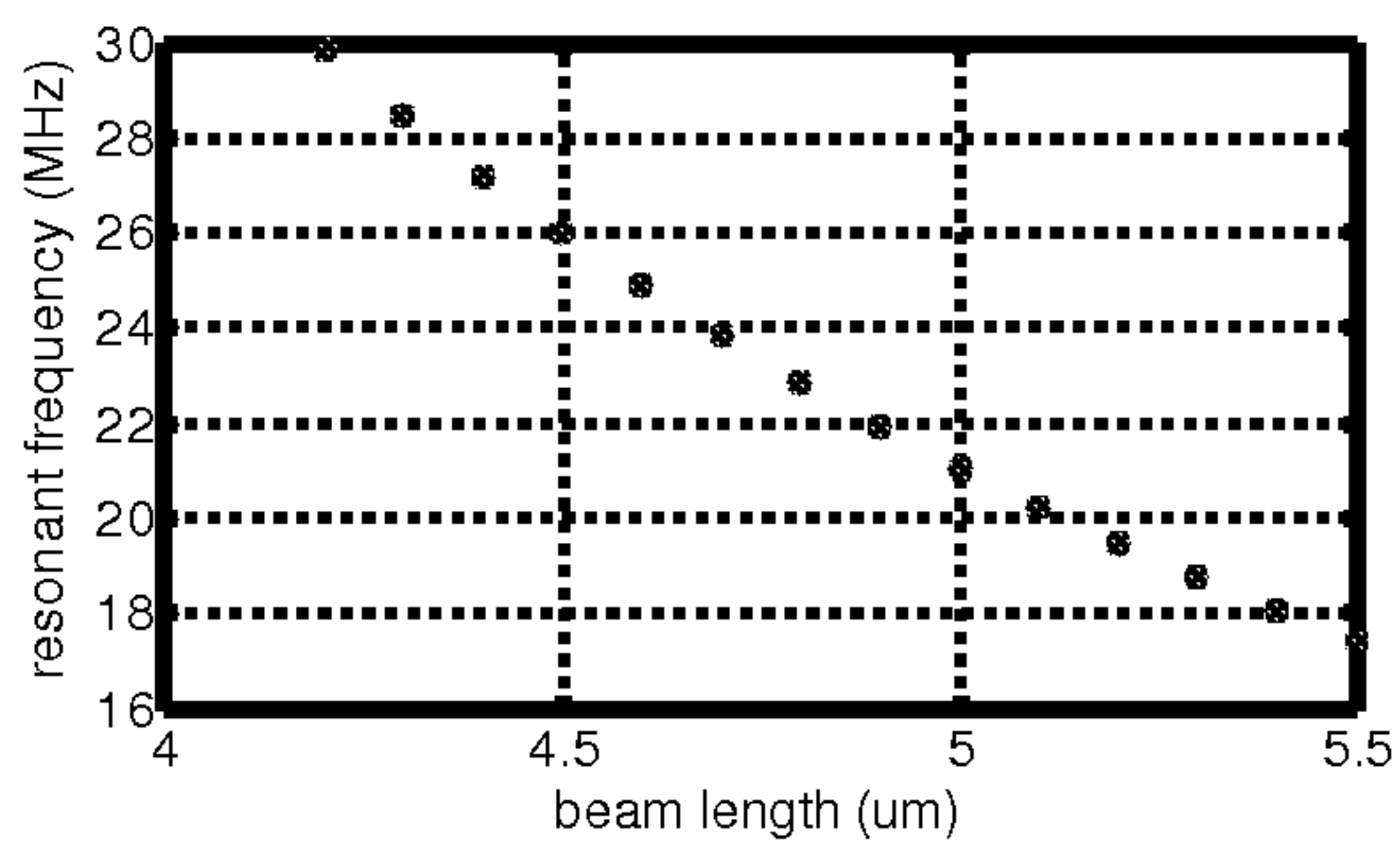
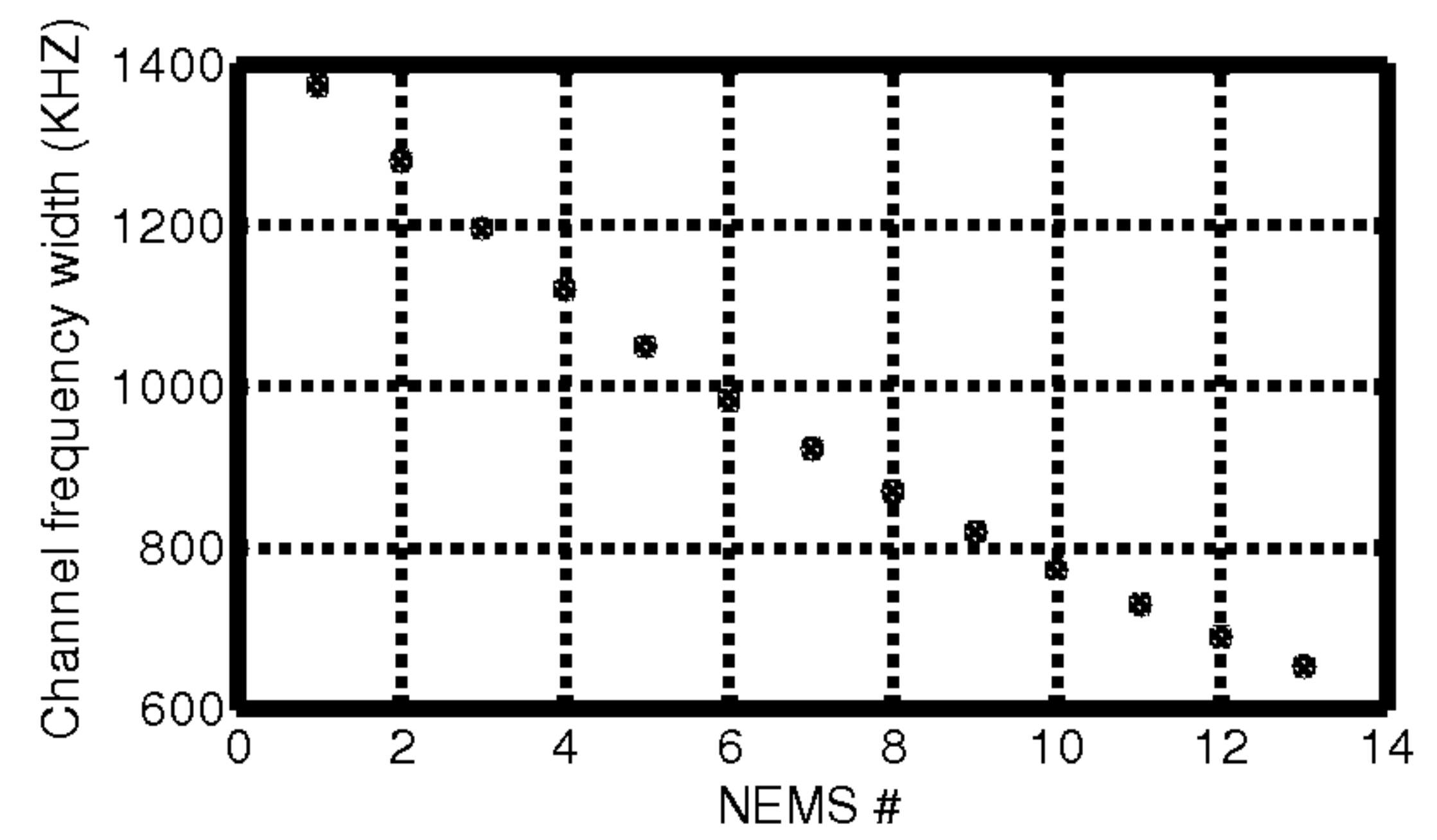
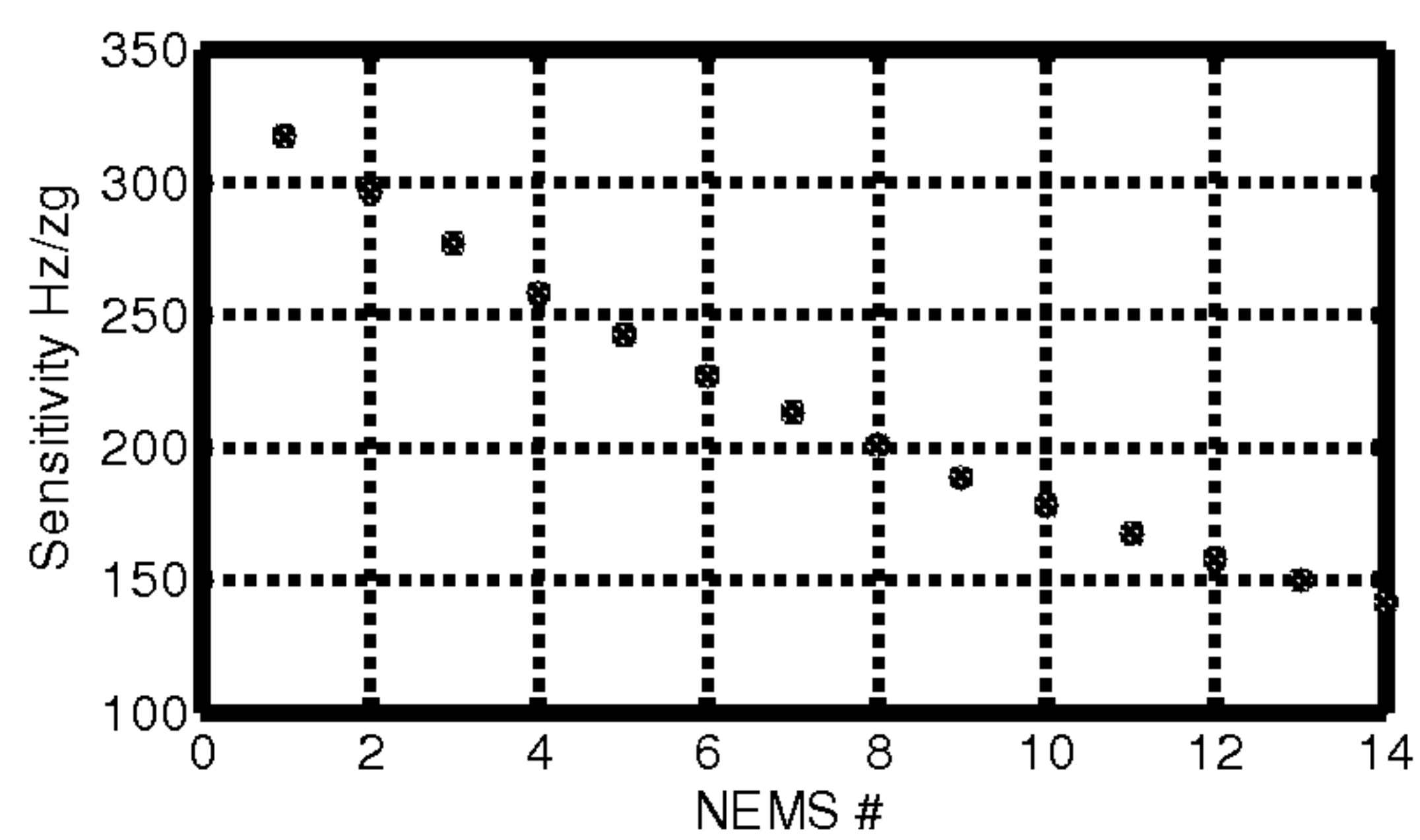
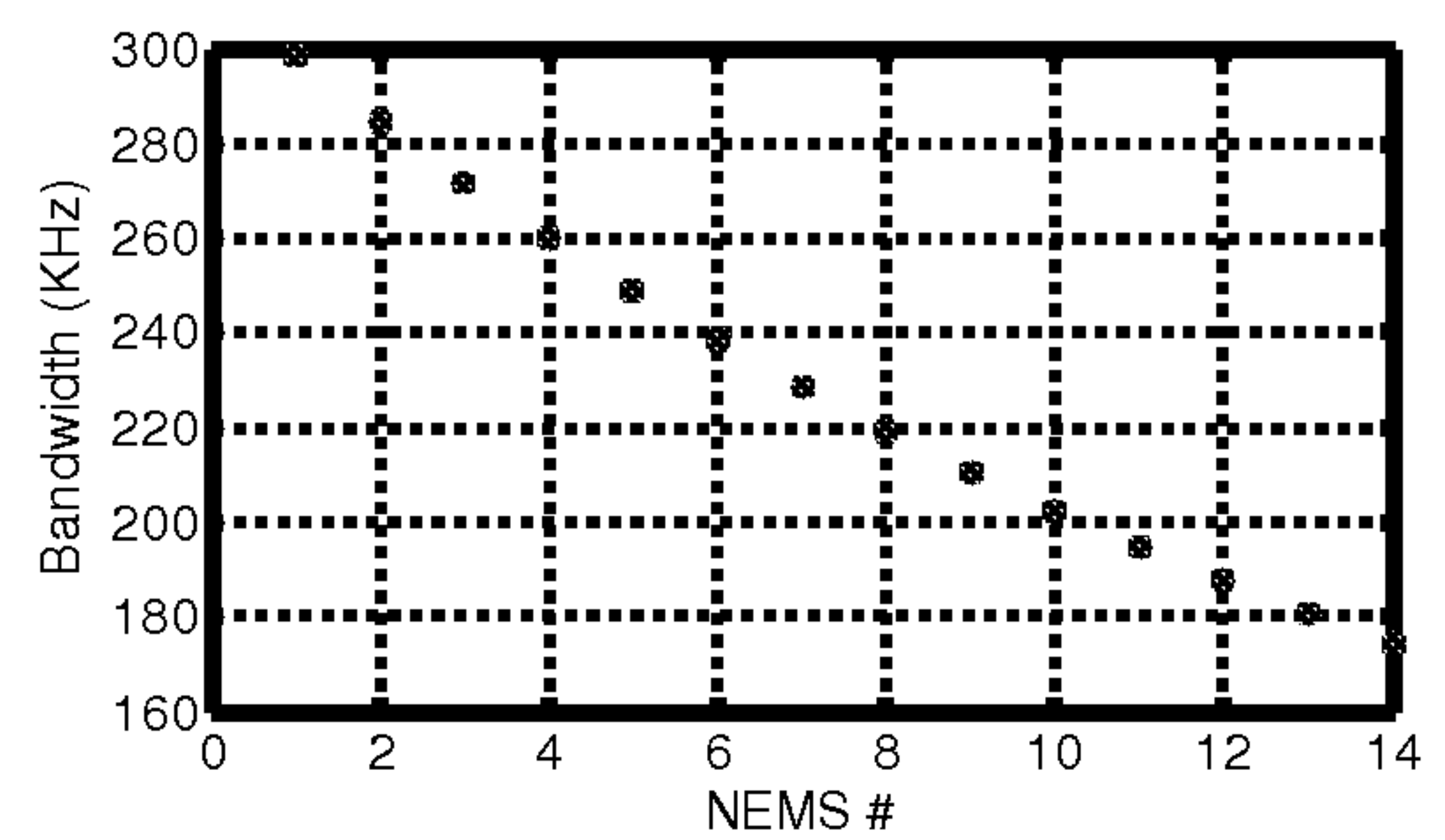
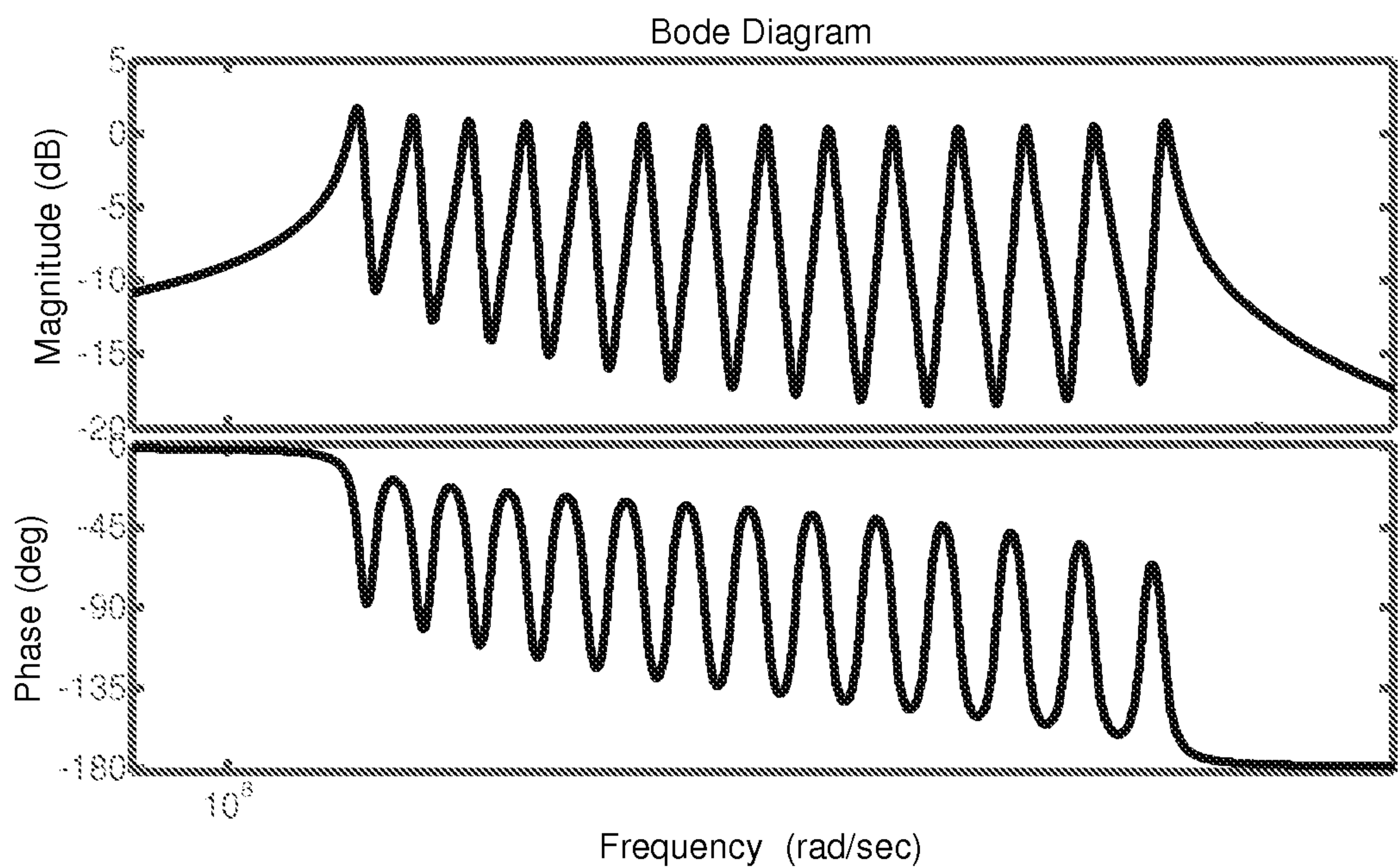
Figure 2



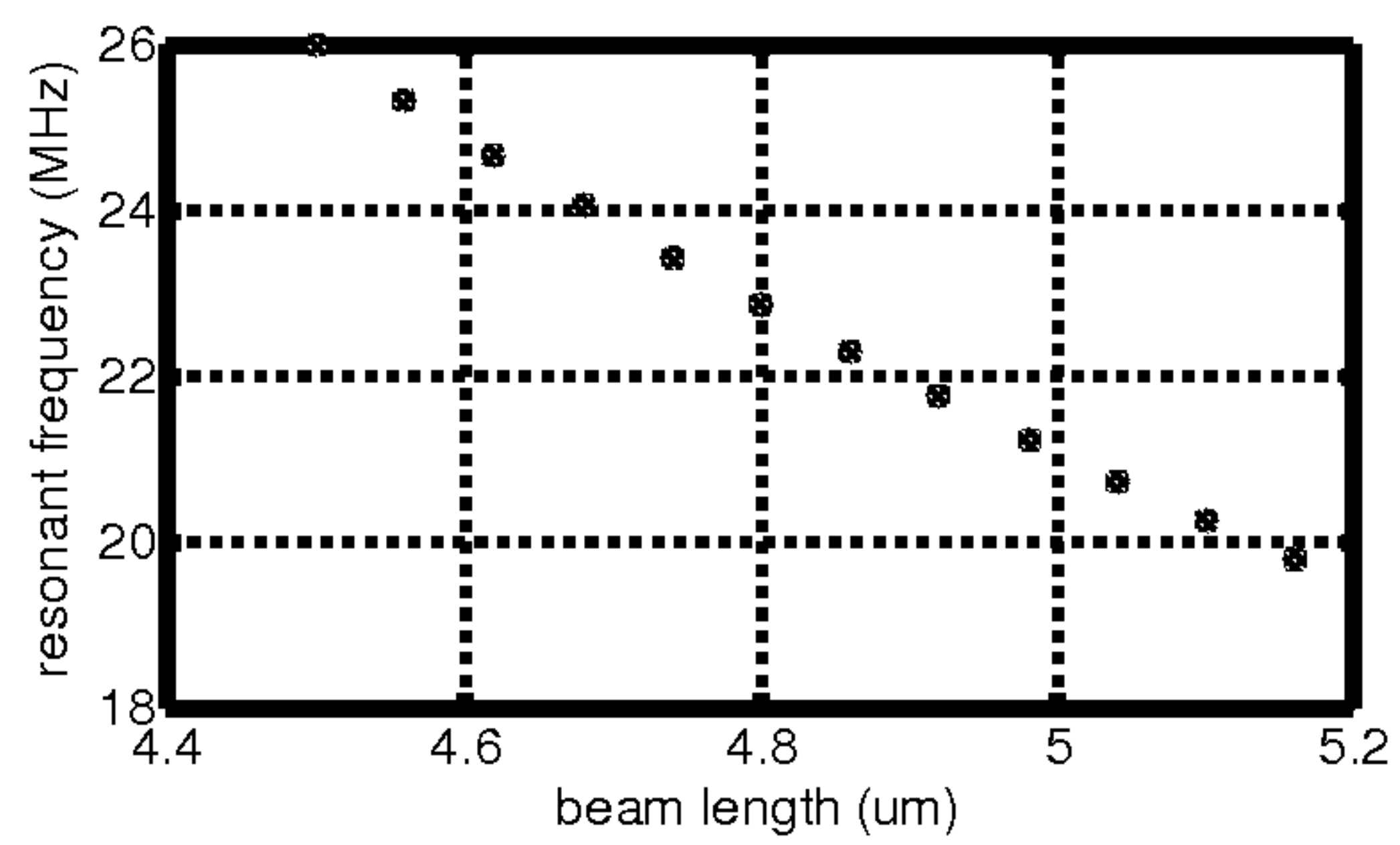
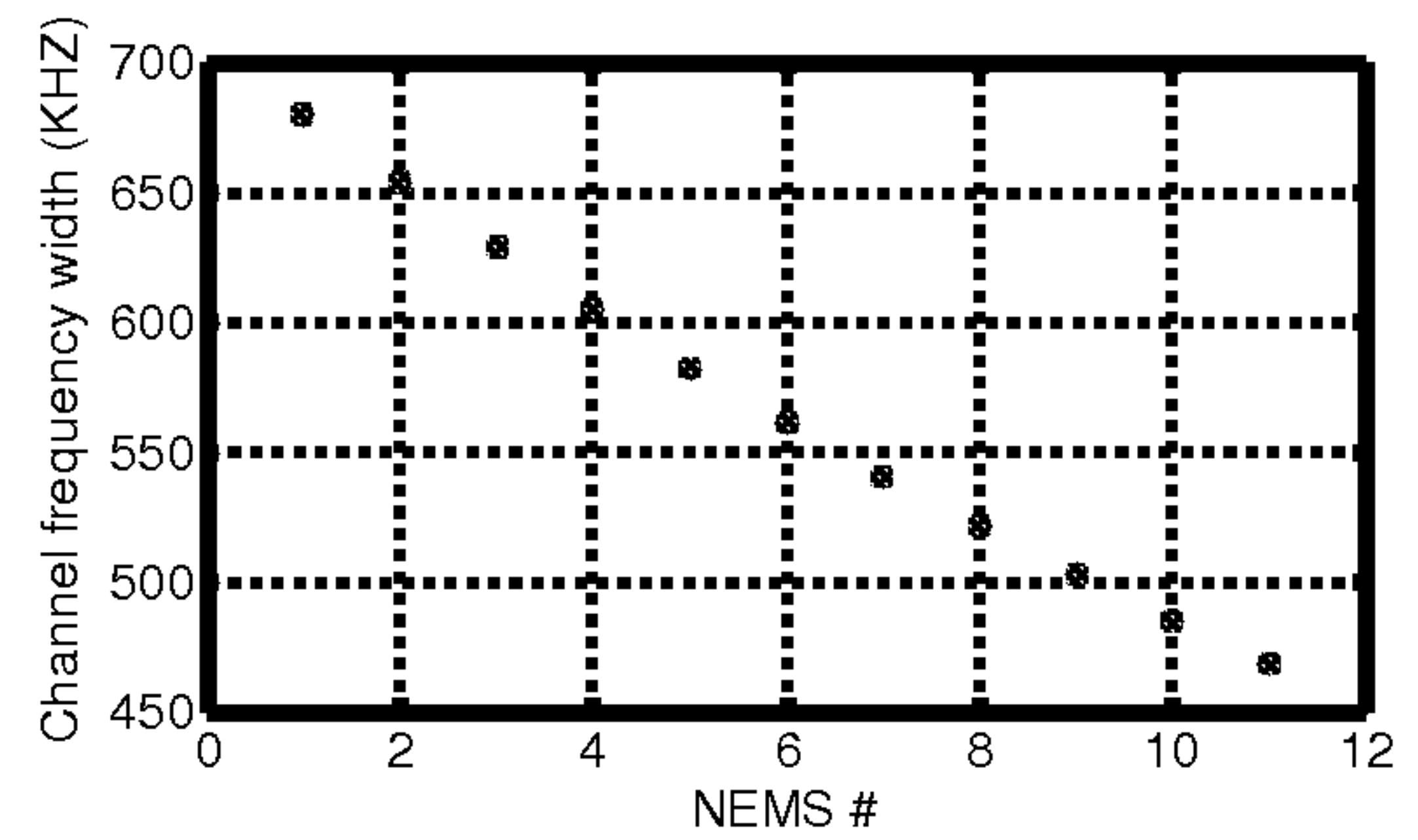
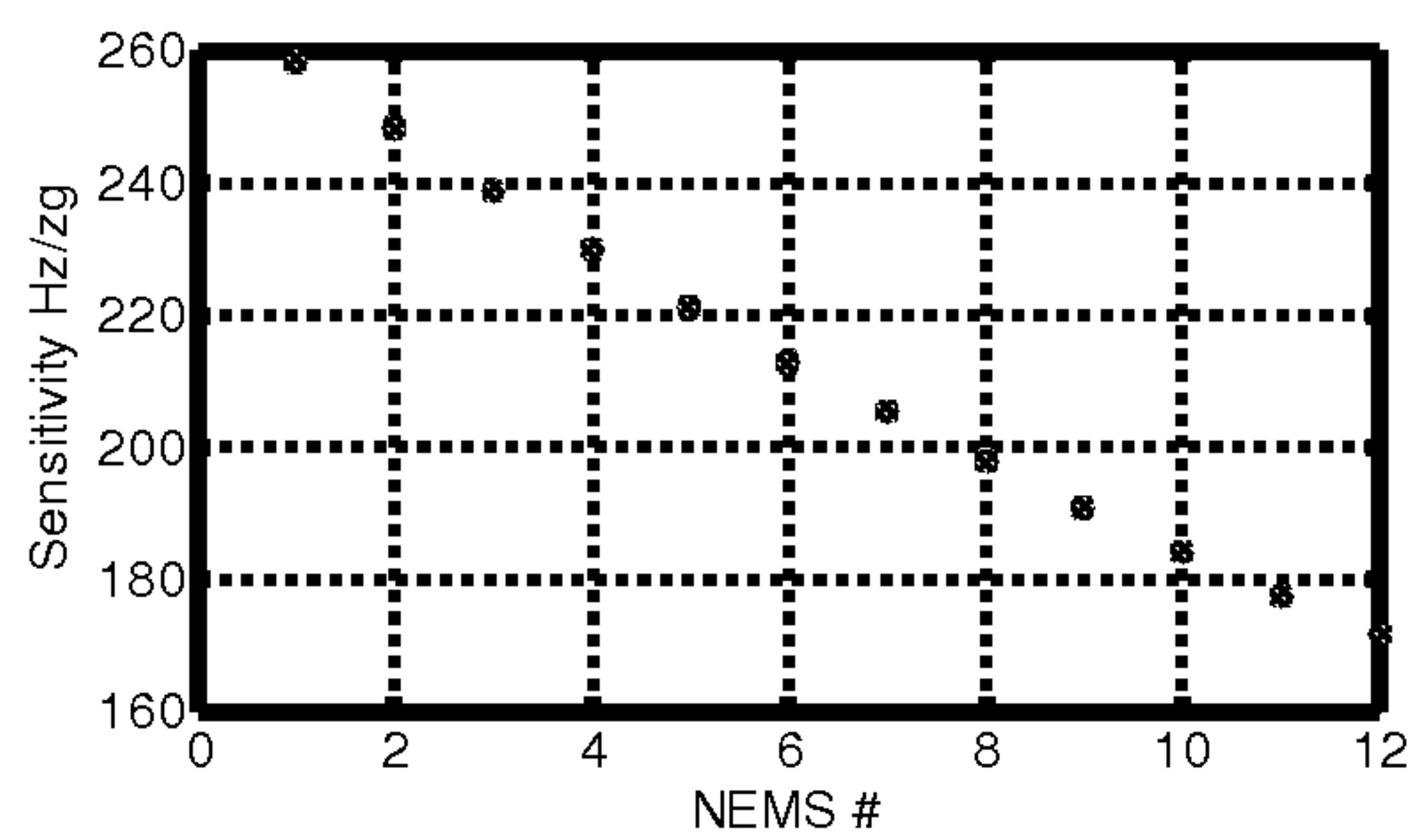
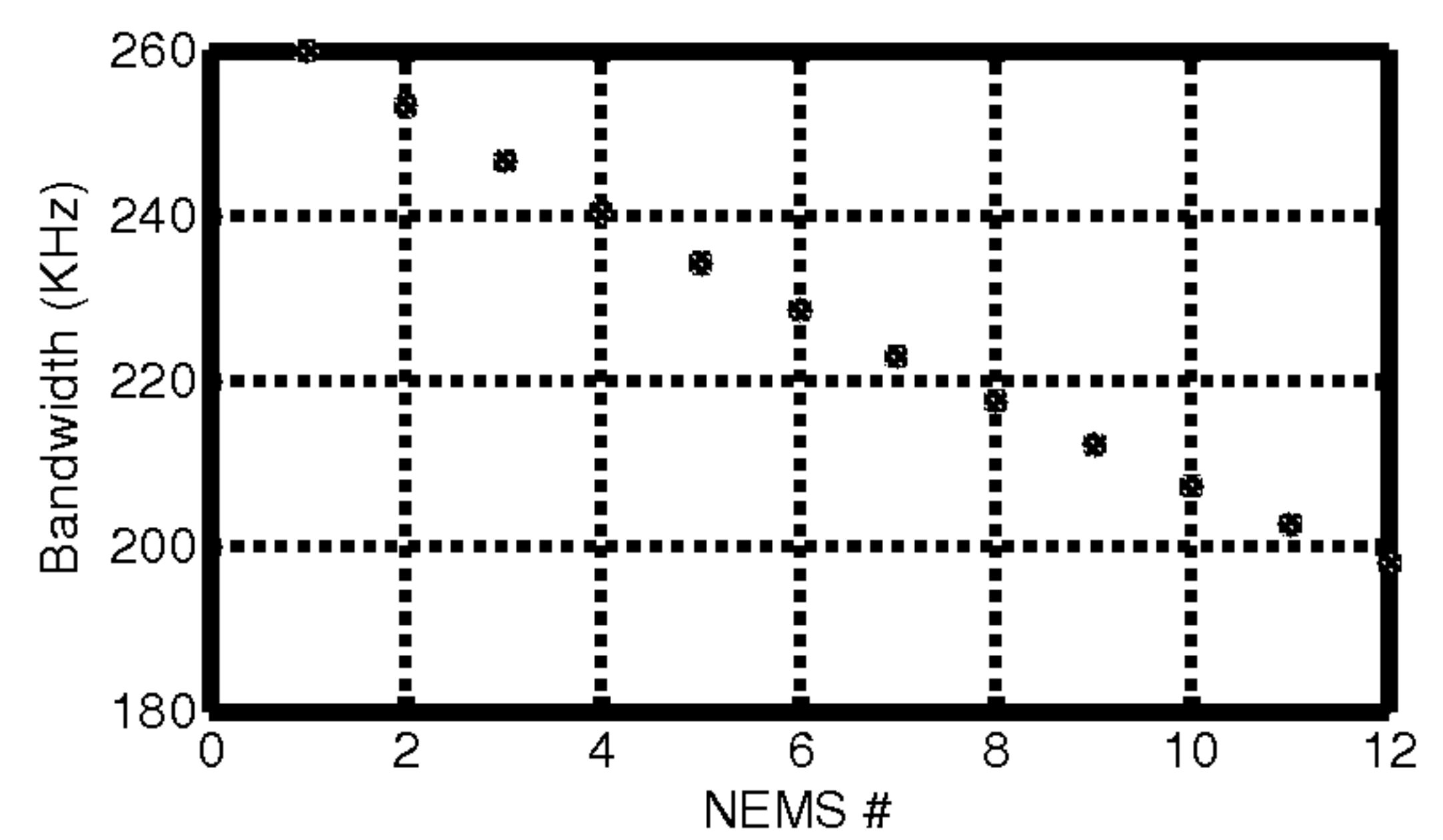
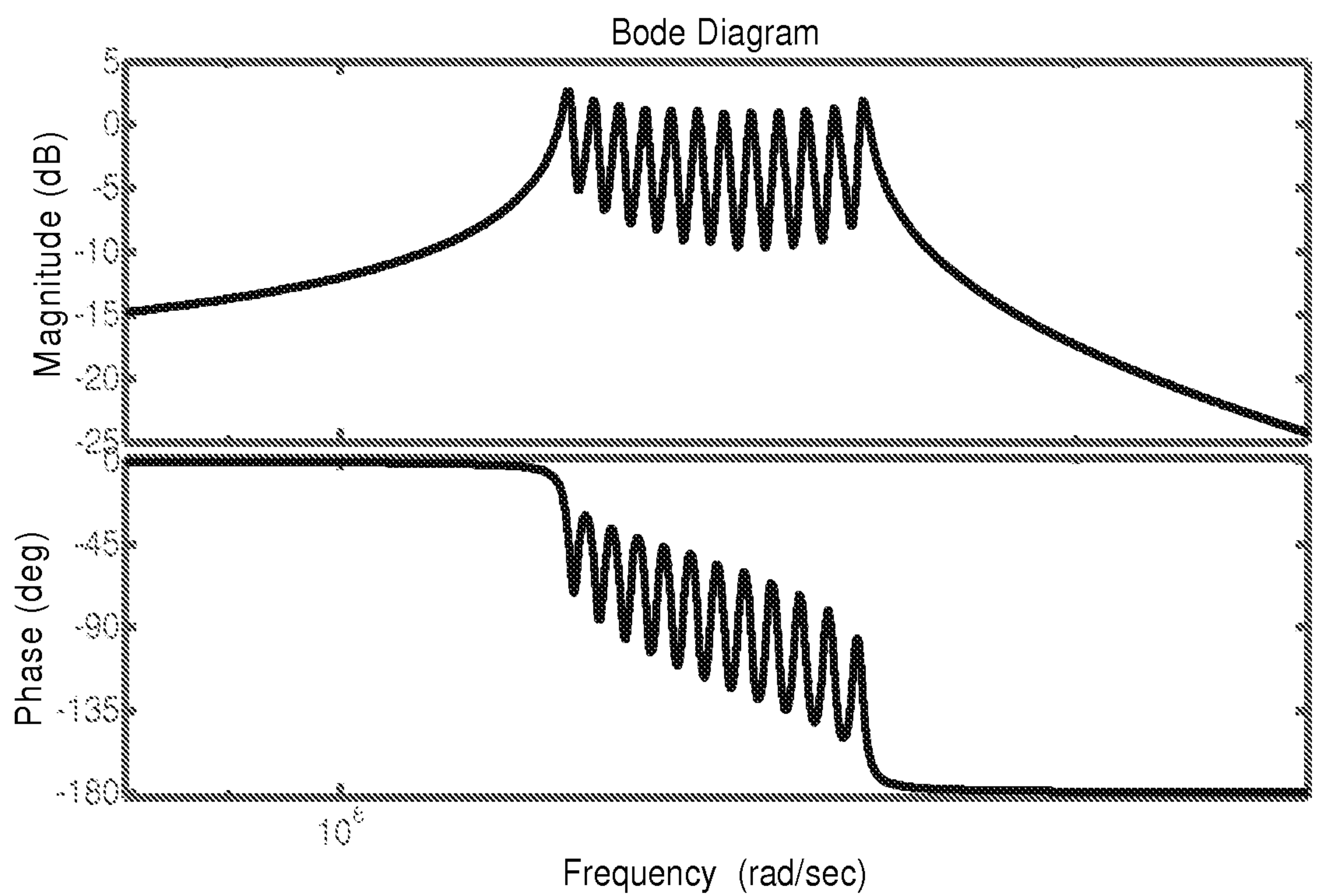
2/7

Figure 3Figure 4

3/7

Figure 5Figure 6Figure 7Figure 8Figure 9

4/7

Figure 10Figure 11Figure 12Figure 13Figure 14

5/7

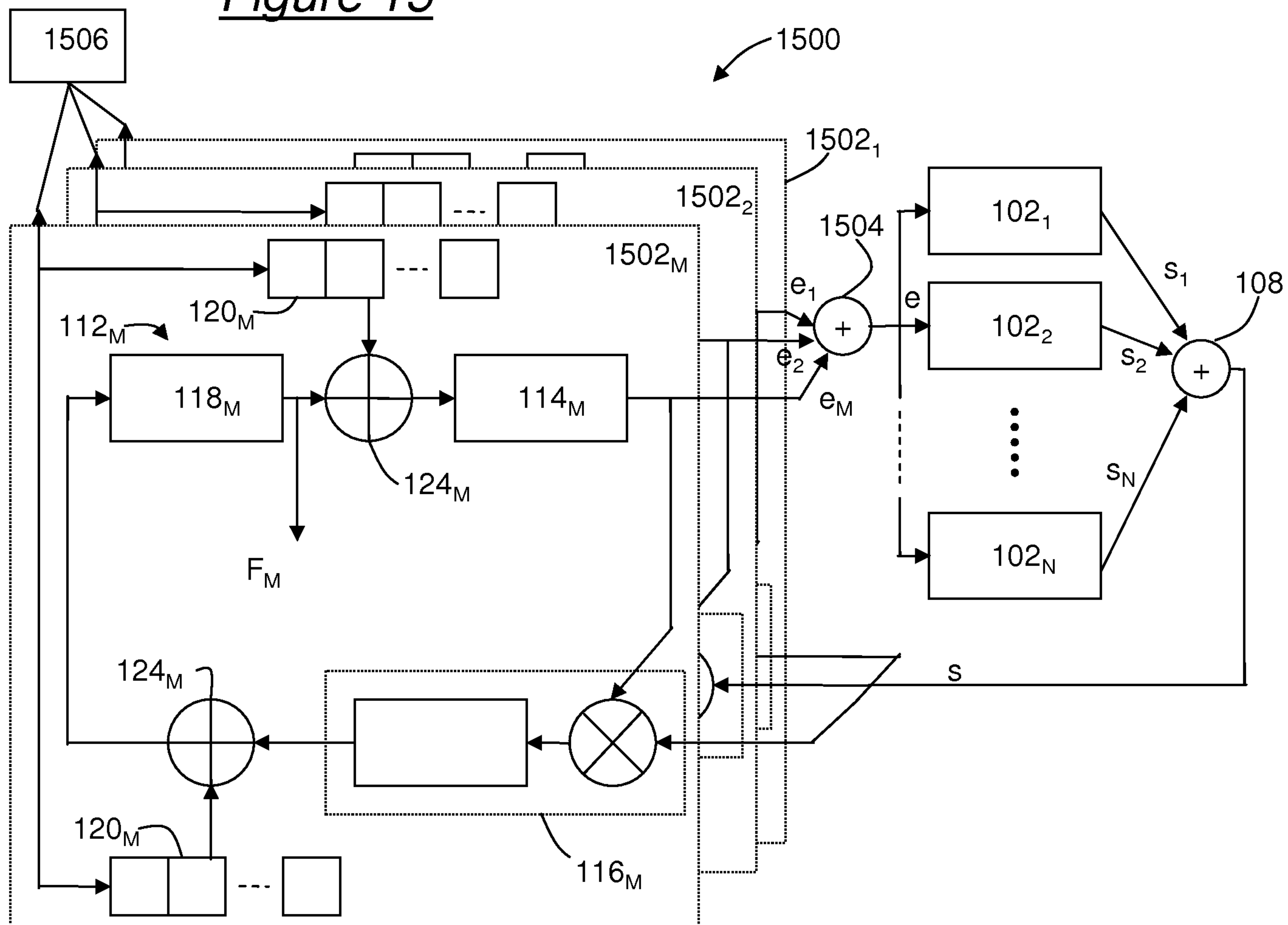
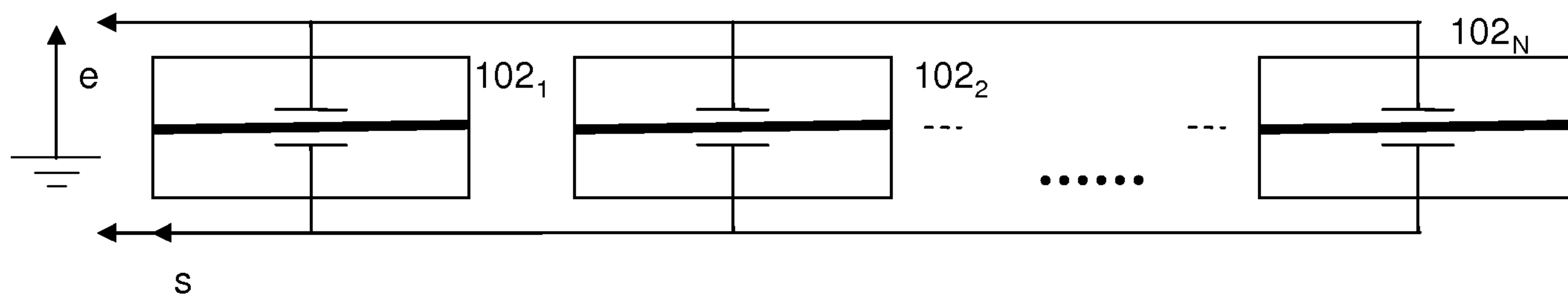
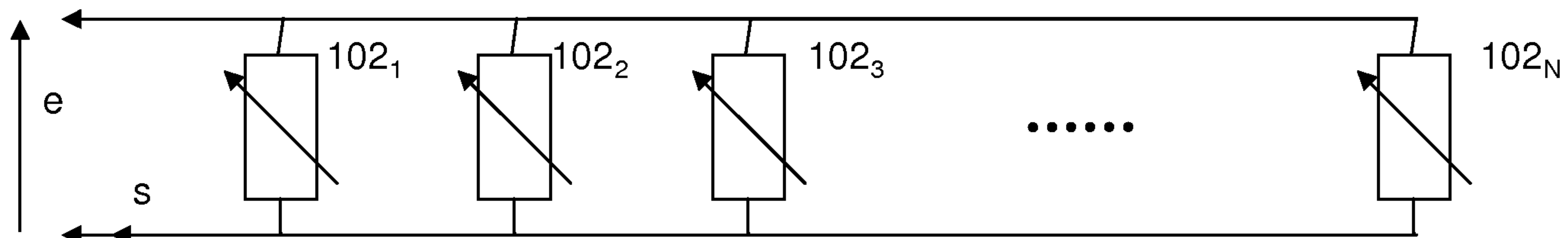
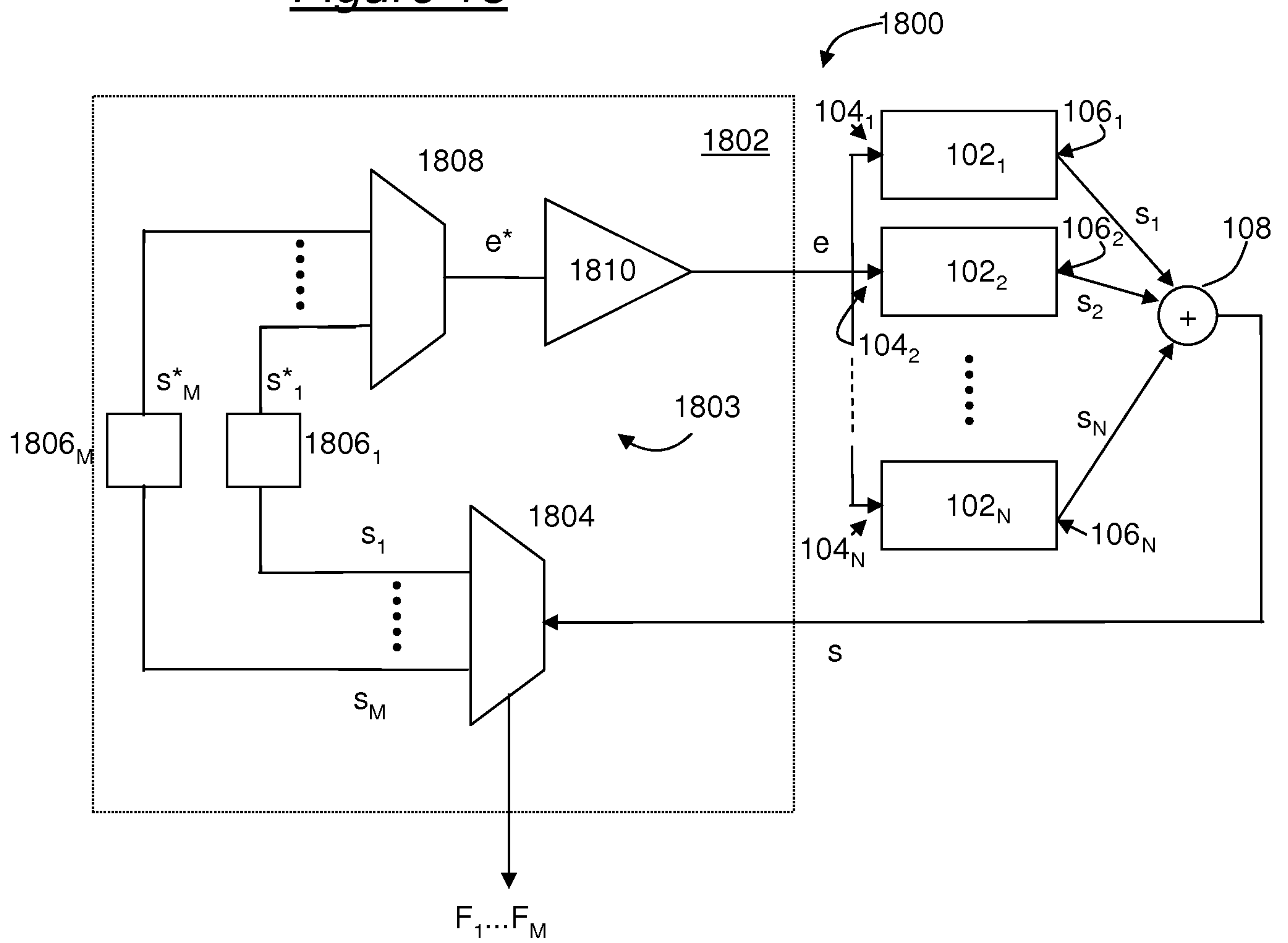
Figure 15Figure 16Figure 17

Figure 18 6/7



7/7

Figure 19