(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년06월08일
(11) 등록번호 10-2406325
(24) 등록일자 2022년06월02일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 27/26 (2006.01) *G01N 27/22* (2006.01)
G01R 23/12 (2006.01) *G01R 23/16* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 27/2617 (2013.01)
G01N 27/221 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0024289
(22) 출원일자 2021년02월23일
심사청구일자 2021년02월23일
(56) 선행기술조사문헌
JP11511247 A
JP2010230466 A
CN109581071 A

(73) 특허권자
한발대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
임홍기
경기도 군포시 고산로539번길 24 동성백두아파트 951-1001
김주성
대전광역시 유성구 지족북로 60, 202동 504호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 플러스

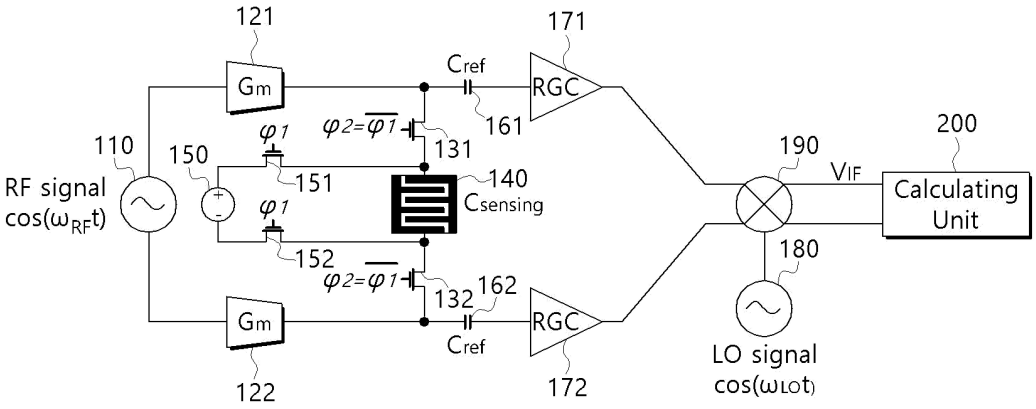
전체 청구항 수 : 총 6 항 심사관 : 공덕현

(54) 발명의 명칭 **물질의 복소 유전율 산출 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 물질의 복소 유전율을 산출하기 위한 시스템에 관한 것으로서, 산출부가 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작를 제어하고, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작에 따라 상기 믹서에서 출력되는 중간 주파수 신호들을 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출하도록 구성됨에 따라, 복소 유전율의 실수부뿐만 아니라 복소 유전율의 허수부 또한 산출할 수 있고, 시스템을 상대적으로 저전력, 저가 및 저면적으로 구현할 수 있다.

대 표 도



(52) CPC특허분류
G01R 23/12 (2013.01)
G01R 23/16 (2021.05)

(72) 발명자
이동호
대전광역시 서구 둔산로 155 크로바아파트 106동 703호

홍성철
대전광역시 유성구 계룡로 92, 101-2304

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711095667
과제번호	2019R1F1A1048784
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	기본연구
연구과제명	복소 유전율 측정 가능한 실리콘 기반의 광대역 유전율 분광학 시스템 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	한밭대학교
연구기간	2019.06.01 ~ 2022.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

교류 전압 신호를 생성하는 교류 전원부;

일단이 상기 교류 전원부의 일단에 연결되는 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기;

일단이 상기 교류 전원부의 타단에 연결되는 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기;

일단이 상기 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단에 연결되는 제1-1 스위치;

일단이 상기 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단에 연결되는 제1-2 스위치;

일단이 상기 제1-1 스위치의 타단에 연결되고, 타단이 상기 제1-2 스위치의 타단에 연결되며, 복소 유전율을 산출하고자 하는 물질이 가해지는 센싱 커패시터;

일단이 상기 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단 및 상기 제1-1 스위치의 일단에 연결되는 제1 기준 커패시터;

일단이 상기 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단 및 상기 제1-2 스위치의 일단에 연결되는 제2 기준 커패시터;

상기 제1 기준 커패시터 및 상기 제2 기준 커패시터를 통해 전달되는 교류 전류 신호를 다운-컨버전하기 위한 국부 발진 신호를 생성하는 국부 발진기;

상기 교류 전류 신호와 상기 국부 발진 신호를 믹싱하여, 상기 교류 전류 신호가 상기 국부 발진 신호에 의해 다운-컨버전(down-conversion)된 중간 주파수 신호를 출력하는 믹서; 및

상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작를 제어하고, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작에 따라 상기 믹서에서 출력되는 중간 주파수 신호들을 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출하는 산출부를 포함하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 산출부는,

상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 오프(off)로 제어한 상태에서 상기 믹서에서 출력되는 제1 중간 주파수 신호와, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 온(on)으로 제어한 상태에서 상기 믹서에서 출력되는 제2 중간 주파수 신호를 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출하는 것을 특징으로 하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 산출부는,

상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 각각 고속 푸리에 변환하여, 상기 제1 중간 주파수 신호의 진폭과 상기 제2 중간 주파수 신호의 진폭을 산출한 뒤, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호의 진폭비를 산출하고,

상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 믹싱하고, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환한 뒤, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호의 위상차를 산출하며,

상기 진폭비 및 상기 위상차를 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출하는 것을 특징으로 하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

청구항 4

제2항에 있어서,

정전압 신호를 생성하는 정전원부;

일단이 상기 정전원부의 일단에 연결되고, 타단이 상기 제1-1 스위치의 타단 및 상기 센싱 커패시터의 일단에 연결되는 제2-1 스위치; 및

일단이 상기 정전원부의 타단에 연결되고, 타단이 상기 제1-2 스위치의 타단 및 상기 센싱 커패시터의 타단에 연결되는 제2-2 스위치를 더 포함하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 산출부는,

상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 오프로 제어할 경우에는, 상기 제2-1 스위치 및 상기 제2-2 스위치를 온으로 제어하고,

상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 온으로 제어할 경우에는, 상기 제2-1 스위치 및 상기 제2-2 스위치를 오프로 제어하는 것을 특징으로 하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

청구항 6

제1항에 있어서,

일단이 상기 제1 기준 커패시터의 타단에 연결되고, 타단이 상기 믹서에 연결되는 제1 RGC(regulated cascade) 소자; 및

일단이 상기 제2 기준 커패시터의 타단에 연결되고, 타단이 상기 믹서에 연결되는 제2 RGC 소자를 더 포함하는, 물질의 복소 유전율 산출 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 물질의 복소 유전율을 산출하기 위한 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 생체 물질이나 화학 물질 등 물질을 검출하기 위한 유전체 센서(dielectric sensor)는 다양한 응용 분야에서 큰 잠재력을 가지고 있다. 예를 들어, 유전체 센서를 이용하여 혈액 내 포도당 농도, 정액의 농도, 토양 및 잎의 수분 함량 등이 모니터링될 수 있다. 이러한 유전체 센서는 물질의 유전율을 산출하는 것을 기본 원리로 하고 있으며, 물질의 유전율을 산출하는 데 이용되는 종래의 시스템으로는 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템과 수신기 기반의 유전율 산출 시스템이 있다.

[0003] 도 1은 종래 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

[0004] 도 1에 도시된 바와 같이, 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템은 위상 주파수 검출기(Phase Frequency Detector; PFD, 11), 전하 펌프(Charge pump, 12), 루프 필터(Loop filter, 13), 전압 제어 발진기(Voltage

Controlled Oscillator; VCO, 14), 주파수 분배기(Frequency divider, 15), ADC(Analog-Digital Converter, 16) 및 산출부(17)로 이루어진다.

[0005] 도 1에 도시된 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템은 위상 변동을 줄여가면서 출력 주파수(f_{VCO})를 입력 주파수(f_{REF})에 동기화시키는 회로이다.

[0006] 위상 주파수 검출기(11)는 예를 들어 TCXO(Temperature Compensated X-tal Oscillator)로부터 온도 변화에 흔들림 없는 입력 주파수(f_{REF})를 갖는 신호를 입력 받을 수 있으며, 이때 입력 주파수(f_{REF})는 기준 주파수가 된다. 또한, 위상 주파수 검출기(11)는 주파수 분배기(15)에 의해 나누어진 출력 주파수($f = f_{VCO}/N$)를 갖는 신호를 입력 받을 수 있다. 위상 주파수 검출기(11)는 상기 입력 주파수(f_{REF})와 상기 주파수 분배기(15)에 의해 나누어진 출력 주파수($f = f_{VCO}/N$)를 비교하여, 그 주파수 차이에 해당하는 전압 혹은 전류 신호를 출력한다.

[0007] 전하 펌프(12)와 루프 필터(13)는 일종의 저역 통과 필터로서 기능하며, 이에 따라 위상 주파수 검출기(11)에서 출력하는 신호는 전하 펌프(12)와 루프 필터(13)를 거치면서 DC 제어 전압(V_{ctrl})으로 변환된다. 이후 상기 DC 제어 전압(V_{ctrl})은 전압 제어 발진기(14) 및 ADC(16)에 입력된다.

[0008] 전압 제어 발진기(14)에는 인덕터(미도시)와 센싱 커패시터(14-1)로 이루어진 LC(Inductor-Capacitor) 공진 회로가 포함되어 있다. 여기서, 상기 센싱 커패시터(14-1)에는 유전율을 산출하고자 하는 물질(생체 물질, 화학 물질 등)이 가해질 수 있으며, 이 경우 상기 센싱 커패시터(14-1)의 커패시턴스($C_{sensing}$)가 물질의 특성에 따라 변하게 된다. 전압 제어 발진기(14)에 DC 제어 전압(V_{ctrl})이 입력될 경우, 전압 제어 발진기(14)는 DC 전압 입력에 대응하는 출력 주파수(f_{VCO})를 갖는 신호를 발생시킨다.

[0009] 주파수 분배기(15)는 기 설정된 주파수 분배 비율(예를 들어, 1:N)에 따라 출력 주파수(f_{VCO})를 분배(분주)하며, 주파수 분배기(15)에 의해 분배된 출력 주파수($f = f_{VCO}/N$)는 위상 주파수 검출기(11)에 피드백 입력된다.

[0010] 이와 같은 피드백 과정을 거치게 되면서, 상기 DC 제어 전압(V_{ctrl})은 입력 주파수(f_{REF})를 기준으로, 입력 주파수(f_{REF})와 출력 주파수(f_{VCO}) 사이의 위상차를 감소시키는 방향으로 변화된다. 전압 제어 발진기(14)에 상기 위상차를 최소화하는 DC 제어 전압(V_{ctrl})이 입력될 경우에는, 출력 주파수(f_{VCO})가 특정 주파수로 잠금(lock)되게 된다.

[0011] ADC(16)는 상기 위상차를 최소화하는 DC 제어 전압(V_{ctrl})을 입력 받아, 이를 디지털 신호로 변환한다. 이후 산출부(17)는 상기 ADC(16)에 의해 변환된 디지털 신호에 기초하여 상기 센싱 커패시터(14-1)의 커패시턴스($C_{sensing}$)를 산출하고, 상기 커패시턴스($C_{sensing}$)에 기초하여 물질의 유전율을 산출한다.

[0012] 한편, 물질의 유전율은 실제로는 복소 유전율을 의미하며, 이와 같은 복소 유전율은 다음의 수학식 1과 같이 나타낼 수 있다.

[0013] [수학식 1]

[0014] $$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

[0015] 상기 수학식 1에서 ε는 복소 유전율이고, ε'은 복소 유전율의 실수부이며, ε''은 복소 유전율의 허수부이다. 복소 유전율의 실수부 ε'은 전자파의 파장과 관련이 있으며, 이를 통해 물질을 구성하고 있는 성분들의 비율 추정이 가능하다. 또한, 복소 유전율의 허수부 ε''은 매질에 의한 에너지 흡수 속도와 관련이 있으며, 이를 통해 유전율을 산출하고자 하는 물질의 전도율(conductivity)을 추정할 수 있고, 나아가 상기 전도성을 이용해서 다양한 의학적 진단이 가능하다.

[0016] 다만, 도 1에 도시된 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템은 복소 유전율의 실수부에 한해서만 산출 가능하다. 또한, 유전율 산출 시스템에서는 넓은 주파수 범위에서 물질의 유전율을 산출할 수 있을 것이 요구되는데, 도 1에 나타낸 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템은 동작 주파수의 제한으로 인해, 이용 가능한 주파수 범위가 비교적 좁다는 문제점이 있다.

[0017] 도 2는 종래 직교 수신기(quadrature receiver) 기반의 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

[0018] 도 2에 도시된 바와 같이, 직교 수신기 기반의 유전율 산출 시스템은 RF(Radio Frequency) 신호원(21), 센싱 커패시터(22), 국부 발진기(23), 믹서(24), 제1 I-Q 믹서(25-1), 제2 I-Q 믹서(25-2), IF(Intermediate Frequency) 신호원(26), 위상 천이기(27), 제1 저역 통과 필터(Low Pass Filter; LPF, 28-1), 제2 저역 통과 필터(28-2) 및 산출부(미도시)로 이루어진다.

[0019] RF 신호원(21)에서는 측정하고자 하는 주파수에 해당되는 정현파 신호를 인가한다. RF 신호원(21)에서 인가되는 정현파 신호는 센싱 커패시터(22)를 거치면서 센싱 커패시터(22)의 커패시턴스(Csensing)에 대응하는 교류 전압 신호로 변환될 수 있다. 여기서, 상기 센싱 커패시터(22)에는 유전율을 산출하고자 하는 물질(생체 물질, 화학 물질 등)이 가해질 수 있으며, 이에 따라 상기 센싱 커패시터(22)의 커패시턴스($C_{sensing}$)가 변하게 된다.

[0020] 국부 발진기(23)에서는 국부 발진 신호(LO signal)를 생성하며, 이때 믹서(24)는 상기 교류 전압 신호와 상기 국부 발진 신호를 믹싱하여, 상기 교류 전압 신호를 1차로 다운-컨버전(down-conversion)한다.

[0021] 믹서(24)에 의해 다운-컨버전된 전압 신호는 제1 I-Q 믹서(25-1) 및 제2 I-Q 믹서(25-2)에 각각 입력된다. IF 신호원(26)에서는 중간 주파수 신호(IF signal)를 생성한다. 이때 제1 I-Q 믹서(25-1)에는 상기 중간 주파수 신호와 위상이 동일한 신호인 동위상 중간 주파수 신호가 입력되고, 제2 I-Q 믹서(25-2)에는 상기 중간 주파수 신호의 위상이 위상 천이기(27)에 의해 90° 천이된 신호인 직교위상 중간 주파수 신호가 입력된다.

[0022] 제1 I-Q 믹서(25-1)는 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호를 상기 동위상 중간 주파수 신호와 믹싱하여, 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호를 재차 다운-컨버전한다. 제2 I-Q 믹서(25-2)는 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호를 상기 직교위상 중간 주파수 신호와 믹싱하여, 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호를 재차 다운-컨버전한다. 여기서, 제1 I-Q 믹서(25-1) 및 제2 I-Q 믹서(25-2)가 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호를 재차 다운-컨버전하는 이유는, 상기 1차로 다운-컨버전된 전압 신호의 중심 주파수를 0으로 조정하여 전압 신호의 판독을 용이하게 하기 위함이다.

[0023] 제1 저역 통과 필터(28-1)는 상기 제1 I-Q 믹서(25-1)에서 출력하는 전압 신호로부터 DC 성분 $Im(S_{21})$을 추출하고, 제2 저역 통과 필터(28-2)는 상기 제2 I-Q 믹서(25-2)에서 출력하는 전압 신호로부터 DC 성분 $Re(S_{21})$을 추출한다. 이후 산출부(미도시)는 상기 DC 성분 $Im(S_{21})$로부터 물질의 복소 유전율의 허수부를 산출하고, 상기 DC 성분 $Re(S_{21})$로부터 물질의 복소 유전율의 실수부를 산출한다.

[0024] 다만, 도 2에 도시된 직교 수신기 기반의 유전율 산출 시스템은 위상 천이기, 다수의 믹서, 다수의 저역 통과 필터 등 많은 수의 소자를 필요로 하기 때문에, 시스템의 소모 전력 상승과 함께 설계의 복잡도가 크다는 문제점이 있다. 또한, 도 2에 나타낸 직교 수신기 기반의 유전율 산출 시스템은 I-Q 믹서를 사용하기 때문에 광대역으로 설계하는 것이 어려워 동작 주파수의 제한이 필요하며, 동위상 중간 주파수 신호와 직교위상 중간 주파수 신호 간에 오차가 발생할 경우에는 물질의 유전율 산출이 정확하게 이루어지기 어렵다는 문제점 또한 있다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0025] (비특허문헌 0001) A. A. Helmy etc., "A Self-sustained CMOS Microwave Chemical Sensor Using a Frequency Synthesizer" in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.47, no.10, pp.2467-2483, Oct. 2012

(비특허문헌 0002) M. Bakhshiani, M. A. Suster and P. Mohseni, "A Broadband Sensor Interface IC for Miniaturized Dielectric Spectroscopy From MHz to GHz" in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.49, no.8, pp.1669-1681, Aug. 2014

발명의 내용

해결하려는 과제

[0026] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 기본적으로 물질의 복소 유전율을 산출할 수 있는 시스템을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

[0027] 또한, 본 발명은 종래 기술에 비해 저전력, 저가, 저면적으로 구현할 수 있는 복소 유전율 산출 시스템을 제공

하는 것에 그 목적이 있다.

[0028] 또한, 본 발명은 종래 기술에 비해 이용 가능한 동작 주파수 범위가 넓고, 정확도 높은 복소 유전율 산출 시스템을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0029] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템은, 교류 전압 신호를 생성하는 교류 전원부; 일단이 상기 교류 전원부의 일단에 연결되는 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기; 일단이 상기 교류 전원부의 타단에 연결되는 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기; 일단이 상기 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단에 연결되는 제1-1 스위치; 일단이 상기 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단에 연결되는 제1-2 스위치; 일단이 상기 제1-1 스위치의 타단에 연결되고, 타단이 상기 제1-2 스위치의 타단에 연결되며, 복소 유전율을 산출하고자 하는 물질이 가해지는 센싱 커패시터; 일단이 상기 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단 및 상기 제1-1 스위치의 일단에 연결되는 제1 기준 커패시터; 일단이 상기 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기의 타단 및 상기 제1-2 스위치의 일단에 연결되는 제2 기준 커패시터; 상기 제1 기준 커패시터 및 상기 제2 기준 커패시터를 통해 전달되는 교류 전류 신호를 다운-컨버전하기 위한 국부 발진 신호를 생성하는 국부 발진기; 상기 교류 전류 신호와 상기 국부 발진 신호를 믹싱하여, 상기 교류 전류 신호가 상기 국부 발진 신호에 의해 다운-컨버전(down-conversion)된 중간 주파수 신호를 출력하는 믹서; 및 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작를 제어하고, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치의 스위칭 동작에 따라 상기 믹서에서 출력되는 중간 주파수 신호들을 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출하는 산출부를 포함할 수 있다.

[0030] 여기서, 상기 산출부는, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 오프(off)로 제어한 상태에서 상기 믹서에서 출력되는 제1 중간 주파수 신호와, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 온(on)으로 제어한 상태에서 상기 믹서에서 출력되는 제2 중간 주파수 신호를 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출할 수 있다.

[0031] 또한, 상기 산출부는, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 각각 고속 푸리에 변환하여, 상기 제1 중간 주파수 신호의 진폭과 상기 제2 중간 주파수 신호의 진폭을 산출한 뒤, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호의 진폭비를 산출하고, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 믹싱하고, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환한 뒤, 상기 제1 중간 주파수 신호와 상기 제2 중간 주파수 신호의 위상차를 산출하며, 상기 진폭비 및 상기 위상차를 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출할 수 있다.

[0032] 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템은, 정전압 신호를 생성하는 정전원부; 일단이 상기 정전원부의 일단에 연결되고, 타단이 상기 제1-1 스위치의 타단 및 상기 센싱 커패시터의 일단에 연결되는 제2-1 스위치; 및 일단이 상기 정전원부의 타단에 연결되고, 타단이 상기 제1-2 스위치의 타단 및 상기 센싱 커패시터의 타단에 연결되는 제2-2 스위치를 더 포함할 수 있다.

[0033] 여기서, 상기 산출부는, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 오프로 제어할 경우에는, 상기 제2-1 스위치 및 상기 제2-2 스위치를 온으로 제어할 수 있고, 상기 제1-1 스위치 및 상기 제1-2 스위치를 온으로 제어할 경우에는, 상기 제2-1 스위치 및 상기 제2-2 스위치를 오프로 제어할 수 있다.

[0034] 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템은, 일단이 상기 제1 기준 커패시터의 타단에 연결되고, 타단이 상기 믹서에 연결되는 제1 RGC(regulated cascade) 소자; 및 일단이 상기 제2 기준 커패시터의 타단에 연결되고, 타단이 상기 믹서에 연결되는 제2 RGC 소자를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

[0035] 본 발명에 의하면, 복소 유전율의 크기 및 위상 산출이 가능하기 때문에, 도 1에 도시한 종래 기술과 달리, 복소 유전율의 실수부뿐만 아니라 복소 유전율의 허수부 역시 산출할 수 있게 된다.

[0036] 또한, 본 발명에 의하면, 도 2에 도시한 종래 기술과 비교해서, 비교적 고전력, 고가 및 고면적이 요구되는 위상 천이기가 요구되지 않고, 믹서의 개수 또한 적게 구성되므로, 복소 유전율을 산출하는 시스템을 상대적으로 저전력, 저가 및 저면적으로 구현할 수 있다.

[0037] 또한, 본 발명에 의하면, 도 2에 도시한 종래 기술과 달리 I-Q 믹서를 사용하지 않기 때문에 이용 가능한 동작 주파수 범위가 넓으며(즉, 광대역 동작이 가능함), 동위상 중간 주파수 신호와 직교위상 중간 주파수 신호 간에 발생하는 오차를 고려할 필요가 없어, 물질의 유전율 산출이 정확도 높게 이루어질 수 있게 된다.

도면의 간단한 설명

[0038] 도 1은 종래 주파수 합성기 기반의 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

도 2는 종래 직교 수신기 기반의 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

도 4는 도 3의 산출부가 물질의 복소 유전율을 산출하는 방법을 단계적으로 도시한 도면이다.

도 5는 산출부가 획득하는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 도시한 도면이다.

도 6은 산출부가 도 5에 도시된 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환할 경우에 나타나는 주파수 성분에 관한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템에 대해 상세하게 설명한다. 첨부한 도면들은 통상의 기술자에게 본 발명의 기술적 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위하여 어디까지나 예시적으로 제공되는 것으로서, 본 발명은 이하 제시되는 도면들로 한정되지 않고 다른 형태로 얼마든지 구체화될 수 있다. 또한, 명세서에 기재된 용어 '…부'는 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어나 소프트웨어, 또는 하드웨어 및 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0040] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템을 도시한 도면이다.

[0041] 도 3에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일 실시예에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템(1000)은 교류 전원부(110), 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기(121), 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기(122), 제1-1 스위치(131), 제1-2 스위치(132), 센싱 커패시터(140), 제1 기준 커패시터(161), 제2 기준 커패시터(162), 국부 발진기(180), 믹서(190) 및 산출부(200)를 포함할 수 있다.

[0042] 교류 전원부(110)는 교류 전압 신호를 생성하며, 이때 교류 전원부(110)에서 생성하는 교류 전압 신호는 $\cos(\omega_{RF} t)$와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ω_{RF}는 교류 전류 신호의 주파수를 의미한다. 통상적으로 ω는 각주파수를 지칭하는 것이며, 이에 따라 본 발명에 관해 설명하는 주파수는 각주파수일 수 있다.

[0043] 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기(121)의 일단은 교류 전원부(110)의 일단에 연결되고, 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기(122)의 일단은 교류 전원부(110)의 타단에 연결된다. 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기(121) 및 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기(122)는 교류 전원부(110)에서 생성되는 교류 전압 신호를 교류 전류 신호로 변환하는 역할을 한다.

[0044] 제1-1 스위치(131)의 일단은 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기(121)의 타단에 연결되고, 제1-2 스위치(132)의 일단은 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기(122)의 타단에 연결된다.

[0045] 센싱 커패시터(140)의 일단은 제1-1 스위치(131)의 타단에 연결되고, 센싱 커패시터(140)의 타단은 제1-2 스위치(132)의 타단에 연결된다. 센싱 커패시터(140)에는 복소 유전율을 산출하고자 하는 물질이 가해질 수 있다. 센싱 커패시터(140)에 상기 물질이 가해지기 전과 비교해서, 센싱 커패시터(140)에 상기 물질이 가해지게 되면 센싱 커패시터(140)의 커패시턴스($C_{sensing}$)가 변하게 된다. 후술하는 산출부(200)에서는 이와 같이 센싱 커패시터(140)에 상기 물질이 가해질 경우, 센싱 커패시터(140)의 커패시턴스가 변하는 원리를 이용하여 상기 물질의 복소 유전율을 산출해낸다.

[0046] 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)로는 NMOS(Negative-channel Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터가 이용될 수 있다. 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)가 NMOS 트랜지스터일 경우, 제1-1 스위치(131)의 일단 및 제1-2 스위치(132)의 일단은 각각 드레인 전극일 수 있고, 제1-1 스위치(131)의 타단 및 제1-2 스위치(132)의 타단은 각각 소스 전극일 수 있다. 또한, 제1-1 스위치(131)의 게이트 전극 및 제1-2 스위치(132)의 게이트 전극은 후술하는 산출부(200)에 연결되어, 산출부(200)에서 출력하는 스위칭 제어 신호가 이에 입력될 수 있다.

[0047] 다만, 본 발명에서 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)로서 NMOS 트랜지스터만 이용될 수 있는 것은 아니며, PMOS(Positive-channel Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터, CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) 트랜지스터 등, 산출부(200)에서 출력하는 스위칭 제어 신호를 입력 받아 온(on) 동작과 오프

(off) 동작을 수행할 수 있는 소자이기만 하면 이에 해당될 수 있다.

[0048] 제1 기준 커패시터(161)의 일단은 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기(121)의 타단 및 제1-1 스위치(131)의 일단에 연결되고, 제2 기준 커패시터(162)의 일단은 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기(122)의 타단 및 제1-2 스위치(132)의 일단에 연결된다.

[0049] 앞서 설명한 바와 같이, 센싱 커패시터(140)에는 복소 유전율을 산출하고자 하는 물질이 가해지기 때문에 센싱 커패시터(140)의 커패시턴스($C_{sensing}$)는 가변하는 값에 해당한다. 이에 반해, 제1 기준 커패시터(161) 및 제2 기준 커패시터(162)에는 상기 물질이 가해지지 않을 뿐만 아니라, 센싱 커패시터(140)에 상기 물질이 가해지는지 여부는 제1 기준 커패시터(161)의 커패시턴스(C_{ref1}) 및 제2 기준 커패시터(162)의 커패시턴스(C_{ref2})에 영향을 미치지 않는다. 즉, 제1 기준 커패시터(161)의 커패시턴스(C_{ref1}) 및 제2 기준 커패시터(162)의 커패시턴스(C_{ref2})는 고정된 값에 해당한다. 여기서, 제1 기준 커패시터(161)의 커패시턴스(C_{ref1}) 및 제2 기준 커패시터(162)의 커패시턴스(C_{ref2})는 동일한 값일 수 있다.

[0050] 국부 발진기(180)는 제1 기준 커패시터(161) 및 제2 기준 커패시터(162)를 통해 전달되는 교류 전류 신호를 다운-컨버전하기 위한 국부 발진 신호를 생성한다. 국부 발진기(180)에서 생성하는 국부 발진 신호는 $\cos(\omega_{LO}t)$와 같이 나타낼 수 있으며, 이때 국부 발진 신호의 주파수 ω_{LO}는 상기 교류 전압 신호의 주파수 ω_{RF}보다 작은 값이다.

[0051] 믹서(190)는 상기 제1 기준 커패시터(161) 및 제2 기준 커패시터(162)를 통해 전달되는 교류 전류 신호와 상기 국부 발진기(180)에서 생성하는 국부 발진 신호를 믹싱하여, 상기 교류 전류 신호가 상기 국부 발진 신호에 의해 다운-컨버전된 신호인 중간 주파수 신호를 출력한다. 믹서(190)는 이에 입력되는 신호를 전압의 형태로 출력하거나 전류의 형태로 출력할 수 있으며, 도 3은 믹서(190)가 중간 주파수 신호(V_{IF})를 전압의 형태로 출력하는 예를 도시한 것이다. 이때 믹서(190)에 의해 출력되는 중간 주파수 신호의 주파수를 ω_{IF}라 할 때, 중간 주파수 신호의 주파수 ω_{IF}는 교류 전류 신호의 주파수 ω_{RF} 및 국부 발진 신호의 주파수 ω_{LO}와 다음의 수학식 2와 같은 관계를 갖게 된다.

[0052] [수학식 2]

[0053] $$\omega_{IF} = \omega_{RF} - \omega_{LO}$$

[0054] 산출부(200)는 스위칭 제어 신호를 생성해서 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)의 스위칭 동작을 제어할 수 있으며, 후술하는 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)의 스위칭 동작 또한 제어할 수 있다. 상기 스위칭 제어 신호는 제1-1 스위치(131), 제1-2 스위치(132), 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)의 각 게이트 전극에 입력될 수 있으며, 상기 스위칭 제어 신호에 의해 제1-1 스위치(131), 제1-2 스위치(132), 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)는 온으로 제어되거나 오프로 제어될 수 있다.

[0055] 또한, 산출부(200)는 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)의 스위칭 동작에 따라, 나아가 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)의 스위칭 동작에 따라 믹서(190)에서 출력되는 중간 주파수 신호들을 이용하여 물질의 복소 유전율을 산출한다.

[0056] 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템(1000)은 정전원부(150), 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)를 추가적으로 포함할 수 있다.

[0057] 정전원부(150)는 일정한 크기의 직류 전압 신호를 생성한다.

[0058] 제2-1 스위치(151)의 일단은 정전원부(120)의 일단에 연결되고, 제2-1 스위치(151)의 타단은 제1-1 스위치(131)의 타단 및 센싱 커패시터(140)의 일단에 연결된다. 제2-2 스위치(152)의 일단은 정전원부(120)의 타단에 연결되고, 제2-2 스위치(152)의 타단은 센싱 커패시터(140)의 타단에 연결된다.

[0059] 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)로는 NMOS 트랜지스터가 이용될 수 있다. 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)가 NMOS 트랜지스터일 경우, 제2-1 스위치(151)의 일단 및 제2-2 스위치(152)의 일단은 각각 드레인 전극일 수 있고, 제2-1 스위치(151)의 타단 및 제2-2 스위치(152)의 타단은 각각 소스 전극일 수 있다. 또한, 제2-1 스위치(151)의 게이트 전극 및 제2-2 스위치(152)의 게이트 전극은 산출부(200)에 연결되어, 산출부(20

0)에서 출력하는 스위칭 제어 신호가 이에 입력될 수 있다.

[0060] 다만, 본 발명에서 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)로서 NMOS 트랜지스터만 이용될 수 있는 것은 아니며, PMOS 트랜지스터, CMOS 트랜지스터 등, 산출부(200)에서 출력하는 스위칭 제어 신호를 입력 받아 온 동작과 오프 동작을 수행할 수 있는 소자이기만 하면 이에 해당될 수 있다.

[0061] 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)가 온으로 동작할 경우, 정전원부(150)에서 생성되는 직류 전압 신호가 센싱 커패시터(140)에 인가됨에 따라, 센싱 커패시터(140)는 일정한 크기의 전압을 안정적으로 보유하게 된다.

[0062] 또한, 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템(1000)은 제1 RGC 소자(171) 및 제2 RGC 소자(172) 또한 포함할 수 있다.

[0063] 제1 RGC 소자(171)의 일단은 제1 기준 커패시터(161)의 타단에 연결되고, 제1 RGC 소자(171)의 타단은 믹서(190)에 연결된다. 제2 RGC 소자(172)의 일단은 제2 기준 커패시터(162)의 타단에 연결되고, 제2 RGC 소자(172)의 타단은 믹서(190)에 연결된다. 제1 RGC 소자(171)는 제1 기준 커패시터(161)를 통해 전달되는 교류 전류 신호를 기 설정된 증폭비로 증폭하는 역할을 하고, 제2 RGC 소자(172)는 제2 기준 커패시터(162)를 통해 전달되는 교류 전류 신호를 기 설정된 증폭비로 증폭하는 역할을 한다. 제1 RGC 소자(171) 및 제2 RGC 소자(172)에 각각 기 설정된 증폭비는 동일할 수 있다. 제1 RGC 소자(171) 및 제2 RGC 소자(172)에 의해 교류 전류 신호가 기 설정된 증폭비로 증폭될 경우, 산출부(200)에서 산출하는 복소 유전율의 정확도 향상에 기여할 수 있게 된다.

[0064] 도 4는 도 3의 산출부가 물질의 복소 유전율을 산출하는 방법을 단계적으로 도시한 도면으로서, 이하에서는 도 4를 더 참고하여 본 발명에 따른 물질의 복소 유전율 산출 시스템(1000)에 의해 물질의 복소 유전율이 산출되는 과정에 대해 설명하기로 한다.

[0065] 도 4를 참고하면, 산출부(200)는 먼저 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 오프로 제어한 상태에서, 믹서(190)에서 출력되는 제1 중간 주파수 신호를 획득한다(S100). 산출부(200)가 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 오프로 제어할 경우에는, 센싱 커패시터(140)가 일정한 크기의 전압을 안정적으로 보유할 수 있도록 하기 위하여, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)를 온으로 제어할 수 있다. 이와 같이 센싱 커패시터(140)가 일정한 크기의 전압을 안정적으로 보유하게 되면, 이후 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)가 온으로 제어되고, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)가 오프로 제어될 경우, 제1 기준 커패시터(161) 및 제2 기준 커패시터(162)를 통해 믹서(190)로 전달되는 교류 전류 신호 역시 안정적이게 되므로, 산출부(200)에서 산출하는 복소 유전율의 정확도가 향상될 수 있게 된다.

[0066] 도 5는 산출부가 획득하는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 도시한 도면이다.

[0067] 산출부(200)가 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 오프로 제어하고, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)를 온으로 제어하면(도 5에서 "φ1 = high"), 트랜스컨덕턴스 증폭기(121, 122)에서 출력되는 전류가 노드 A 및 A'에서 분기되지 않은 채 그대로 기준 커패시터(161, 162)에 전달된다.

[0068] 즉, S100 단계에서는 기준 커패시터(161, 162)와 센싱 커패시터(140)의 연결이 끊어진 플로팅(floating) 상태가 되며, 이때 산출부(200)가 획득하는 제1 중간 주파수 신호는 $A_1\cos(\omega_{IF}\,t + \Theta_0)$와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A_1은 제1 중간 주파수 신호의 진폭이고, ω_{IF}는 제1 중간 주파수 신호의 주파수이며, t는 시간이고, Θ_0는 제1 중간 주파수 신호의 위상이다.

[0069] 상기 S100 단계 이후에, 산출부(200)는 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 온으로 제어한 상태에서, 믹서(190)에서 출력되는 제2 중간 주파수 신호를 획득한다(S200). 산출부(200)가 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 온으로 제어할 경우에는, 센싱 커패시터(140)가 더 이상 안정적인 전압을 보유하고 있을 필요가 없기 때문에, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)를 오프로 제어할 수 있다. 즉, 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)의 온오프 동작과, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)의 온오프 동작은 상보적으로 이루어지게 된다.

[0070] 다시 도 5를 참고하면, 산출부(200)가 제1-1 스위치(131) 및 제1-2 스위치(132)를 온으로 제어하고, 제2-1 스위치(151) 및 제2-2 스위치(152)를 오프로 제어하면(도 5에서 "φ2 = high"), 트랜스컨덕턴스 증폭기(121, 122)에서 출력되는 전류가 노드 A 및 A'에서 분기되기 때문에, 기준 커패시터(161, 162)에는 센싱 커패시터(140)로 분기된 전류를 제외한 전류가 전달된다. 즉, 상기 S200 단계에서는 상기 S100 단계에 비해 기준 커패시터(161, 162)에 전달되는 전류의 양이 감소하게 된다.

[0071] 즉, S200 단계에서는 기준 커패시터(161, 162)와 센싱 커패시터(140)가 서로 연결된 상태가 되며, 이때 산출부(200)가 획득하는 제2 중간 주파수 신호는 $A_2\cos(\omega_{IF}t + \Theta_0 + \Theta_{MUT})$와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A_2는 제2 중간 주파수 신호의 진폭이고, ω_{IF}는 제2 중간 주파수 신호의 주파수이며, t는 시간이고, $\Theta_0 + \Theta_{MUT}$는 제2 중간 주파수 신호의 위상이다. 이에 의하면, 제2 중간 주파수 신호는 제1 중간 주파수 신호와 비교해서 주파수는 동일하지만, 제2 중간 주파수 신호의 진폭은 제1 중간 주파수의 진폭에 비해 A_2/A_1 만큼 변하고, 제2 중간 주파수 신호의 위상은 제1 중간 주파수의 위상에 비해 Θ_{MUT} 만큼 변한다는 것을 알 수 있다.

[0072] 비록 도 4에서는 산출부(200)가 제1 중간 주파수 신호를 획득한 뒤 제2 중간 주파수 신호를 획득하는 것으로 도시되어 있으나, 이와 달리 산출부(200)는 제2 중간 주파수 신호를 획득한 뒤 제1 중간 주파수 신호를 획득하여도 무방하다.

[0073] 상기 S200 단계 이후에, 산출부(200)는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 각각 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform; FFT)하여, 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1과 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 산출할 수 있다. 보다 구체적으로, 산출부(200)가 제1 중간 주파수 신호를 고속 푸리에 변환하게 되면, 주파수 ω_{IF} 지점에는 $A_1/2$에 해당하는 신호의 크기가 존재하게 된다. 그리고 산출부(200)가 제2 중간 주파수 신호를 고속 푸리에 변환하게 되면, 주파수 ω_{IF} 지점에는 $A_2/2$에 해당하는 신호의 크기가 존재하게 된다. 이에 따라, 산출부(200)는 상기 신호의 크기들을 이용해서, 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1과 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 산출할 수 있다.

[0074] 비록 도 4에는 산출부(200)가 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 획득한 뒤, 제1 중간 주파수 신호의 진폭과 제2 중간 주파수 신호의 진폭을 산출하는 것으로 도시되어 있지만, 산출부(200)는 제1 중간 주파수 신호를 획득한 뒤 제2 중간 주파수 신호를 획득하기 전에 제1 중간 주파수 신호의 고속 푸리에 변환을 통해 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1을 산출할 수 있다. 또한, 산출부(200)가 제2 중간 주파수 신호를 제1 중간 주파수 신호보다 먼저 획득한 경우에는, 제2 중간 주파수 신호를 획득한 뒤 제1 중간 주파수 신호를 획득하기 전에 제2 중간 주파수 신호의 고속 푸리에 변환을 통해 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 산출할 수 있다.

[0075] 산출부(200)가 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1과 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 산출한 이후에는, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비를 산출할 수 있다. 상술한 바와 같이, 제1 중간 주파수 신호는 기준 커패시터(161, 162)와 센싱 커패시터(140)의 연결이 끊어진 상태에서 획득되는 신호이므로, 제1 중간 주파수 신호는 기준 주파수 신호로서 기능할 수 있다. 그리고 제2 중간 주파수 신호는 기준 커패시터(161, 162)와 센싱 커패시터(140)가 서로 연결된 상태에서 획득되는 신호이므로, 기준 주파수 신호인 제1 중간 주파수 신호 대비 변화된 주파수 신호로서 기능할 수 있다. 이에 따라, 산출부(200)는 예를 들어 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1으로 나눔으로써, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비를 산출할 수 있다(S300).

[0076] 상기 S300 단계 이후에, 산출부(200)는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱(혹은, 곱셈)할 수 있다. 산출부(200)가 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹싱 신호는 다음의 수학식 4와 같이 나타낼 수 있다.

[0077] [수학식 4]

[0078] <중간 주파수 믹싱 신호>

[0079] $= A_1\cos(\omega_{IF}t + \Theta_0) \times A_2\cos(\omega_{IF}t + \Theta_0 + \Theta_{MUT})$

[0080] $= 1/2 \times A_1A_2[\cos(2\omega_{IF}t + 2\Theta_0 + \Theta_{MUT}) + \cos(\Theta_{MUT})]$

[0081] 수학식 4를 참고하면 중간 주파수 믹싱 신호에서 주파수가 0인 신호, 즉 DC 신호는 그 크기가 $1/2 \times A_1A_2\cos(\Theta_{MUT})$임을 알 수 있다. 이에 따라, 산출부(200)는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 위상차를 산출하기 위해, 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환할 수 있다.

[0082] 도 6은 산출부가 도 5에 도시된 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹

싱 신호를 고속 푸리에 변환할 경우에 나타나는 주파수 성분에 관한 도면이다.

[0083] 도 6을 참고하면, 중간 주파수 믹싱 신호는 $2\omega_{IF}$에서 $1/4 \times A_1A_2$ 값을 가지며, 중간 주파수 믹싱 신호의 DC 성분은 $1/2 \times A_1A_2\cos(\Theta_{MUT})$ 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 이에 따라, 산출부(200)는 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환한 뒤, 중간 주파수 믹싱 신호의 DC 성분의 크기를 획득하고, 상기 DC 신호의 크기와, 앞서 S300 단계에서 산출한 제1 중간 주파수 신호의 진폭 A_1 및 제2 중간 주파수 신호의 진폭 A_2를 이용해서 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 위상차 Θ_{MUT}를 산출할 수 있다(S400). 여기서, 위상차 Θ_{MUT}는 제2 중간 주파수 신호의 위상 $\Theta_0 + \Theta_{MUT}$에서 제1 중간 주파수 신호의 위상 Θ_0를 감산한 값일 수 있다.

[0084] 한편, 상기 수학식 1에 나타낸 물질의 복소 유전율 ε은 다음의 수학식 3과 같이 나타낼 수도 있다.

[0085] [수학식 3]

[0086] $$\varepsilon = |\varepsilon| e^{j\theta}$$

[0087] 수학식 3에서 $|\varepsilon|$은 복소 유전율의 크기이고, Θ는 복소 유전율의 위상이며, j는 허수 단위이다.

[0088] 복소 유전율의 크기 $|\varepsilon|$가 클수록 센싱 커패시터(140)의 임피던스는 작아지기 때문에, 노드 A 및 A'에서 센싱 커패시터(140) 쪽으로 분기되는 전류가 커지게 되며, 이에 따라 제1 중간 주파수 신호의 진폭을 기준으로 했을 때 제2 중간 주파수 신호의 진폭은 작아지게 된다. 즉, 복소 유전율의 크기는, 제1 중간 주파수 신호 및 제2 중간 주파수 신호의 진폭비와 대략 반비례 관계를 갖는다고 할 수 있다.

[0089] 또한, 복소 유전율의 위상 Θ는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호 사이에 위상차를 발생시키는 데 기여한다. 즉, 센싱 커패시터(140)에 가해지는 물질의 복소 유전율의 위상으로 인해, 제1 중간 주파수 신호의 위상을 기준으로 했을 때 제2 중간 주파수 신호의 위상에 변화가 발생하게 되는 것이다.

[0090] 이를 달리 말하면, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비는 복소 유전율의 크기를 산출할 수 있는 기초가 되고, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 위상차는 복소 유전율의 위상을 산출할 수 있는 기초가 된다고 할 수 있다. 이에 따라, 산출부(200)는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비 및 위상차를 이용하여, 센싱 커패시터(140)에 가해진 물질의 복소 유전율을 산출할 수 있다(S500).

[0091] 예를 들어, 산출부(200)에는 상기 진폭비와 상기 복소 유전율의 크기가 서로 대응하여 기록된 진폭비-복소 유전율의 크기에 관한 룩업 테이블이 미리 저장되어 있을 수 있다. 또한, 산출부(200)에는 상기 위상차와 상기 복소 유전율의 위상이 서로 대응하여 기록된 위상차-복소 유전율의 위상에 관한 룩업 테이블이 미리 저장되어 있을 수 있다. 이 경우 산출부(200)는 상기 진폭비-복소 유전율의 크기에 관한 룩업 테이블을 통해, 상기 S300 단계에서 산출한 진폭비에 대응하는 복소 유전율의 크기 $|\varepsilon|$를 산출할 수 있다. 이와 마찬가지의 방식으로 산출부(200)는 상기 위상차-복소 유전율의 위상에 관한 룩업 테이블을 통해, 상기 S400 단계에서 산출한 위상차에 대응하는 복소 유전율의 위상 Θ를 산출할 수 있다.

[0092] 산출부(200)가 복소 유전율의 크기 $|\varepsilon|$ 및 위상 Θ를 산출한 경우, 복소 유전율의 실수부 $\varepsilon' = |\varepsilon|\cos\Theta$와 같이 구할 수 있고, 복소 유전율의 허수부 $\varepsilon'' = -|\varepsilon|\sin\Theta$와 같이 구할 수 있다.

[0093] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 이는 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 위에서는 비록 산출부(200)가 복소 유전율의 크기 및 위상을 산출부(200)에 미리 저장된 룩업 테이블들을 통해 산출하는 방법에 대해 설명하였으나, 복소 유전율의 크기는 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비를 이용해서 얼마든지 상이한 방법으로 산출할 수 있고, 복소 유전율의 위상 역시 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 위상차를 이용해서 얼마든지 상이한 방법으로 산출할 수 있는 것이다. 따라서, 본 발명의 기술적 사상은 청구범위에 의해서만 파악되어야 하고, 이의 균등 또는 등가적 변형 모두는 본 발명의 기술적 사상의 범주 안에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0094] 110: 교류 전원부

121: 제1 트랜스컨덕턴스 증폭기 122: 제2 트랜스컨덕턴스 증폭기

131: 제1-1 스위치 132: 제1-2 스위치

140: 센싱 커패시터 150: 정전원부

151: 제2-1 스위치 152: 제-2 스위치

161: 제1 기준 커패시터 162: 제2 기준 커패시터

171: 제1 RGC 소자 172: 제2 RGC 소자

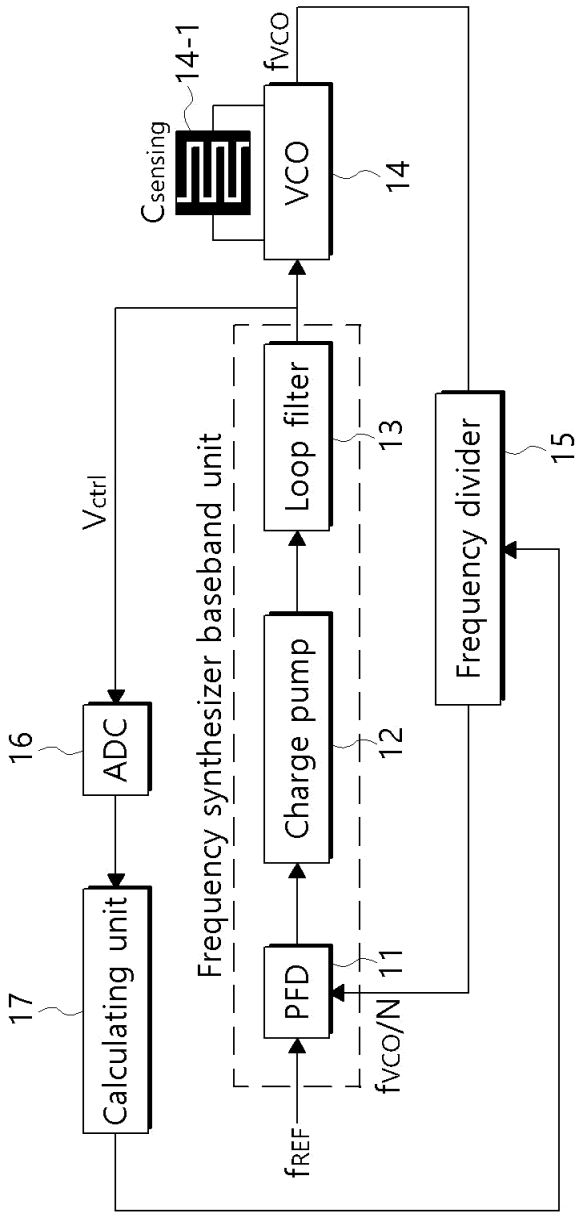
180: 국부 발진기 190: 믹서

200: 산출부

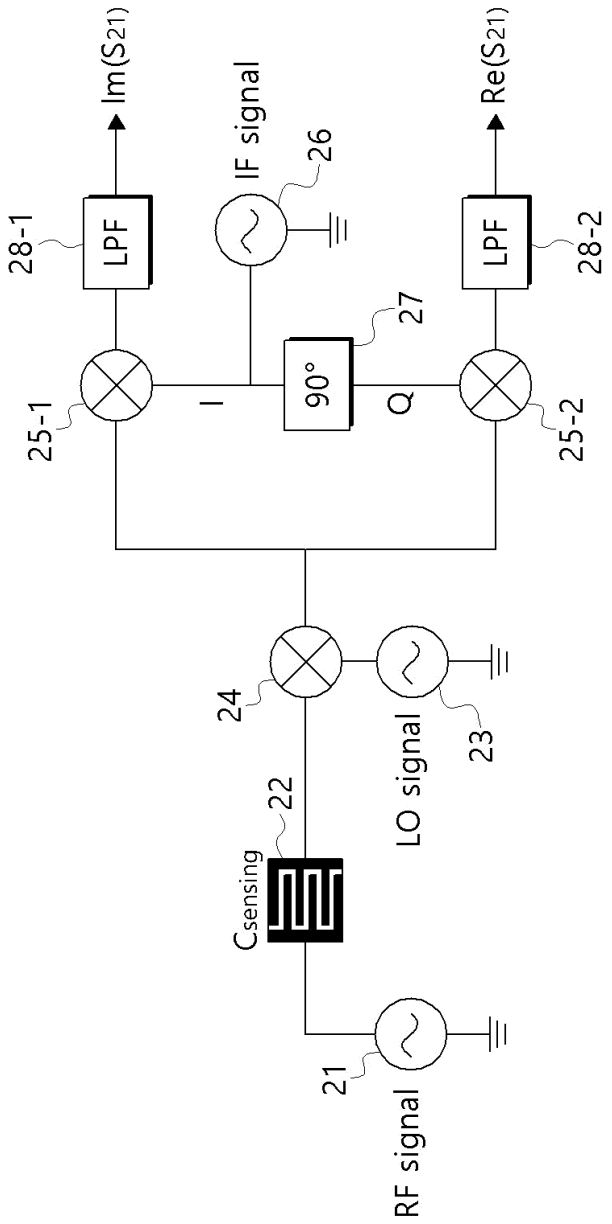
1000: 물질의 복소 유전율 산출 시스템

도면

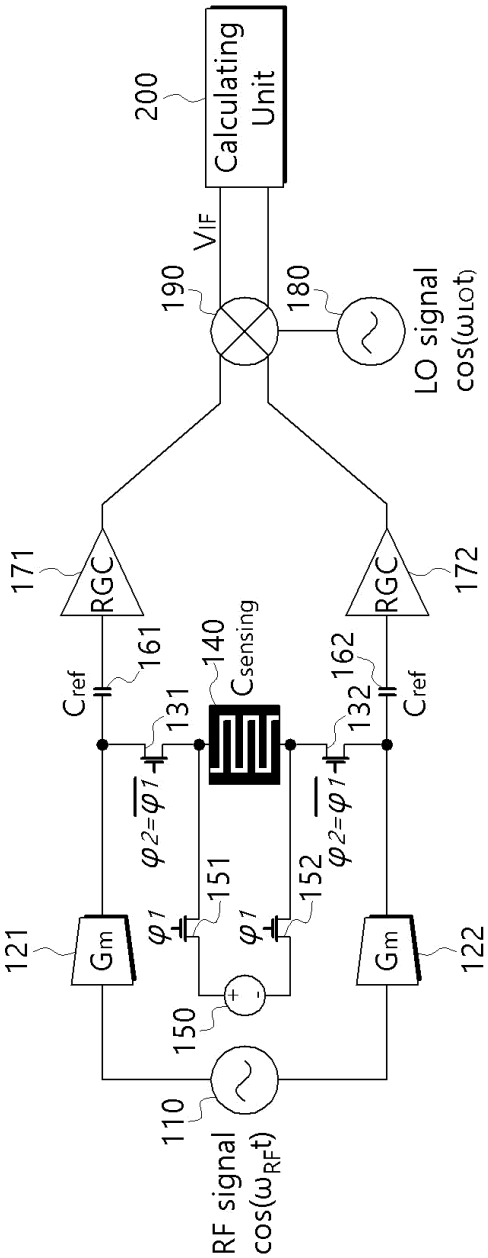
도면1


14-1
Csensing
fVCO
VCO
14
Loop filter
13
Charge pump
12
PFD
11
fVCO/N
fREF
Frequency synthesizer baseband unit
Frequency divider
15
Vctrl
16
ADC
17
Calculating unit

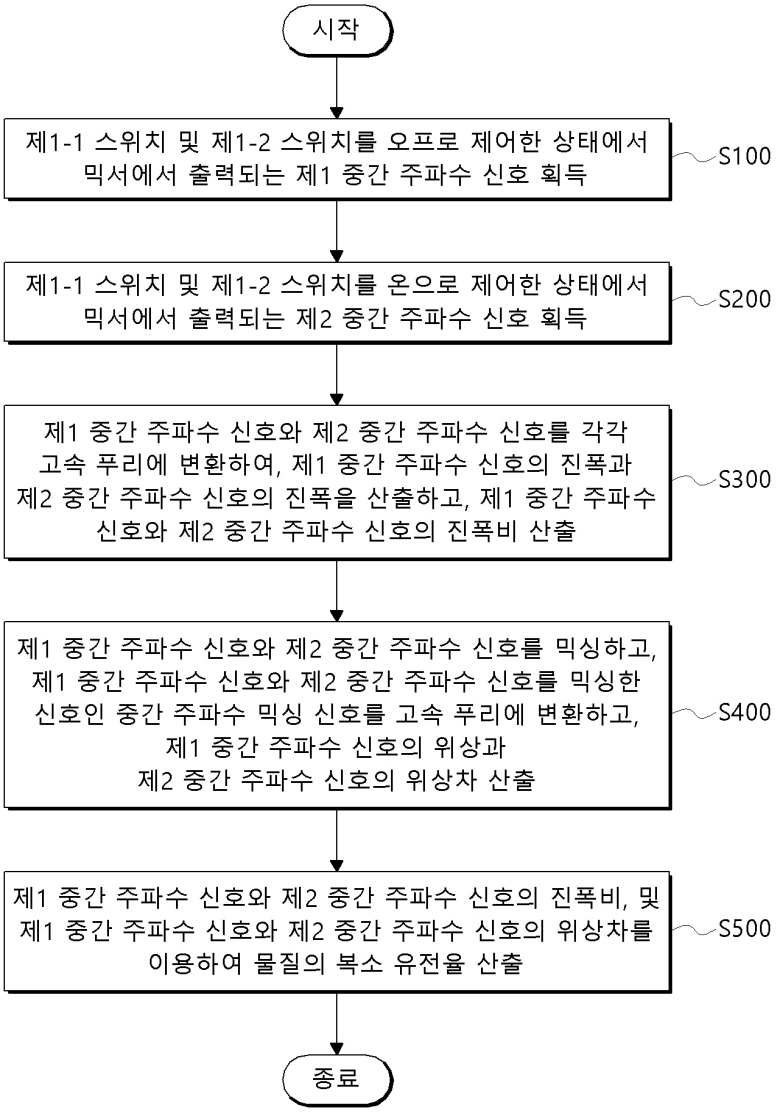
도면2


Im(S21)
IF signal
Re(S21)
28-1
LPF
26
LPF
28-2
27
25-1
I
90°
Q
25-2
24
LO signal
23
22
Csensing
21
RF signal

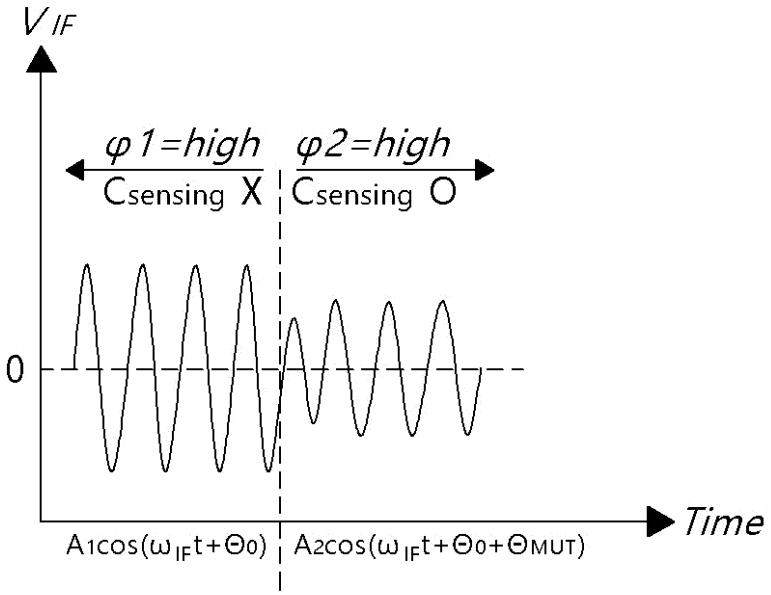
도면3


200
Calculating Unit
VIF
190
180
LO signal
cos(ωLOt)
171
RGC
172
RGC
161
Cref
140
Csensing
162
Cref
131
132
φ2=φ1
φ2=φ1
151
152
φ1
φ1
121
Gm
122
Gm
150
110
RF signal
cos(ωRFt)

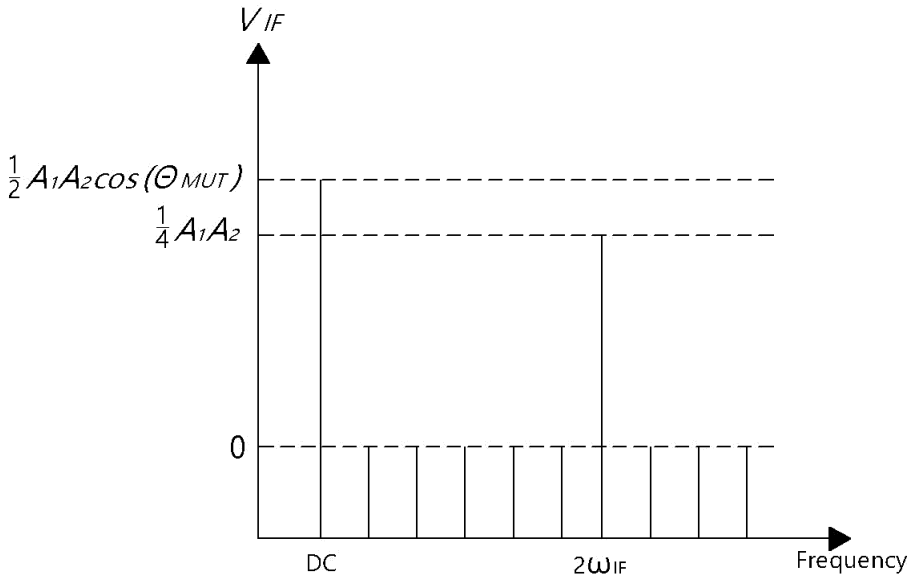
도면4


시작
제1-1 스위치 및 제1-2 스위치를 오프로 제어한 상태에서 믹서에서 출력되는 제1 중간 주파수 신호 획득
S100
제1-1 스위치 및 제1-2 스위치를 온으로 제어한 상태에서 믹서에서 출력되는 제2 중간 주파수 신호 획득
S200
제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 각각 고속 푸리에 변환하여, 제1 중간 주파수 신호의 진폭과 제2 중간 주파수 신호의 진폭을 산출하고, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비 산출
S300
제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱하고, 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호를 믹싱한 신호인 중간 주파수 믹싱 신호를 고속 푸리에 변환하고, 제1 중간 주파수 신호의 위상과 제2 중간 주파수 신호의 위상차 산출
S400
제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 진폭비, 및 제1 중간 주파수 신호와 제2 중간 주파수 신호의 위상차를 이용하여 물질의 복소 유전율 산출
S500
종료

도면5


V IF
φ1=high
Csensing X
φ2=high
Csensing O
0
Time
A1cos(ω IFt+Θ0)
A2cos(ω IFt+Θ0+ΘMUT)

도면6


V IF
1/2 A1A2cos(ΘMUT)
1/4 A1A2
0
DC
2ω IF
Frequency