비선형 소자 탐지용 광대역 스파이럴 안테나의 설계

Design of Broadband Spiral Antenna for Non-Linear Junction Detector

김 태 근 · 민 경 식 · 이 광 근*

Tae-Geun Kim · Kyeong-Sik Min · Kwang-Kun Lee*

요 약

본 논문은 비선형 소자 탐지용 광대역 스파이럴 안테나의 설계를 제안한 것이다. 방사면 위의 스파이럴 소자뿐만 아니라 방사면 중심부에 위치한 방사 소자인 타원형 패치가 스파이럴 안테나의 광대역화를 위하여 설계되었다. 또한, 그라운드면 위에 스파이럴 슬릿을 삽입함으로써 다중 공진을 일으키는 안테나 그라운드 구조가 제안되었다. 제안된 안테나의 높은 지향성과 고이득을 실현하기 위해, Fr4-epoxy로 만든 캐비티 벽과 금속 캡이 설계에 고려되었다. 그 결과, 금속 캡을 가진 안테나의 계산된 이득은 금속 캡이 없는 안테나의 이득과 비교하여 약 3 dBi 개선되었으며, $-z$ 축 방향으로의 측정된 주 빔 지향성도 계산 결과와 잘 일치하였다. 설계 주파수 대역에서 측정된 축비도 $-z$ 축을 기준으로 $\pm 45^\circ$ 의 범위에서 원편파를 만족하였으며, 예상과 잘 일치하였다.

Abstract

This paper presents a design of spiral antenna with broad bandwidth for non-linear junction detector(NLJD). An elliptical patch as radiating element located on center position of radiating surface, as well as the spiral elements on radiating surface was designed for broad bandwidth of spiral antenna. An antenna ground structure generating the multi resonance by spiral slit inserted on ground surface was also proposed. In order to realize high directivity and high gain of the proposed antenna, the cavity wall made of Fr4-epoxy and the metal cap were considered in design. As a result, the calculated gain of antenna with metal cap was improved about 3 dB with comparison of antenna without metal cap and the measured main beam directivity toward $-z$ axis direction agreed well with calculation result. The measured axial ratio satisfied the circular polarization within $-z$ axis $\pm 45^\circ$ at design frequency bands and showed reasonable agreement with prediction.

Key words : Spiral Antenna, Circular Polarization, Cavity Wall, Non-Linear Junction Detector(NLJD)

I. 서 론

최근 극소형 전자 디바이스 산업의 비약적 발전으로 불순 목적의 무단 은닉 디바이스의 국외 유출이 국가적 문제로 대두되고 있다. 이를 위해 국외에서는 유출 방지를 위한 디텍터의 개발이 꾸준히 연구되어 왔다^[1]. 디텍터에 쓰이는 탐지용 안테나로는

주로 스파이럴 안테나가 사용된다. 은닉 디바이스를 찾기 위해서 방향 탐지용 안테나가 사용되며, 안테나의 방사 패턴은 디바이스를 탐지하기 위한 방향으로만 방사되도록 제작된 캐비티 백(cavity-backed) 방식이 보편적이다^{[2],[3]}. 탐지용 스파이럴 안테나에 대해서는 최근 국내에서도 정보 보안의 중요성이 높아짐에 따라 국산화 및 연구 개발에 힘쓰고 있는 추세

「이 연구는 Post-BK21사업과 2010년도 (주)한썸의 민군겸용기술개발사업의 지원으로 연구되었음.」

한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University)

*(주)한썸(Hantherm Co.)

· 논문 번호 : 20101102-157

· 교신저자 : 민경식(e-mail : ksmi@hhu.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 12월 24일

이다^{[2],[3]}. 스파이럴 안테나의 대역폭은 주파수에 따른 안테나의 길이 변화를 권선수 및 주회 각도로 제어^{[4],[5]}할 수 있기 때문에 광대역 설계에 사용될 수 있고, 후방 캐비티를 사용함으로써 방향 탐지용 안테나로 많이 사용되고 있다^{[6],[7]}. 그리고 스파이럴 구조를 가지므로 원편파가 생성되며, 이 원편파는 탐색 대상의 편파에 영향을 받지 않으므로 탐색용 안테나로는 최적이라 할 수 있다^[8].

본 논문에서는 송신 주파수 대역 0.8~1 GHz와 은닉 디바이스로부터 반사되어 오는 수신 주파수의 대역 1.6~3 GHz를 모두 수용하기 위한 광대역 안테나 설계를 목표로 하였다.

2장에서는 스파이럴 안테나의 이론적 설계와 시뮬레이션을 통한 특성을 알아보았고, 3장에서는 시뮬레이션의 제원을 바탕으로 안테나를 제작하여 반사 손실, 복사 패턴, 이득을 측정하여 안테나의 신뢰도와 성능을 검증하였다. 4장에서는 지금까지의 결과를 토대로 결론을 도출하였다.

II. 안테나 설계

본 논문에서는 금속과 반도체를 동시에 탐지할 수 있는 스파이럴 광대역 안테나를 설계하였다. 비선형 소자 탐지기의 수신 주파수는 송신 주파수의 체배 주파수에서 나타나는 특성이 있다^[9].

일반적으로 반도체는 실리콘이나 GsAs 기판을 사용하는데, 이런 접합 물질로 부터 반사되어 오는 주파수의 특성은 체배 주파수로 나타난다. 이것을 이용하여 송신 주파수는 0.8~1 GHz, 수신 주파수는 1.6~3 GHz로 2nd harmonic과 3rd harmonic을 동시에 수용하는 수신 대역폭 설정을 하였다. 수신 주파수 대역은 체배 주파수 대역을 이용하는 만큼 2nd harmonic(1.6~2 GHz)과 3rd harmonic(2.4~3 GHz)으로 나뉘게 된다. 그림 1에 타켓 소자의 재질과 상태에 따라 반사되어 오는 고조파의 특성이 틀린 것을 나타내었다. 그림 1에서처럼 반도체 접합 디바이스의 반사 특성은 2nd harmonic의 성분이 강하게 나타나고, 상이금속류의 접합 디바이스는 그림 1과 같이 3rd harmonic의 반사 특성이 강하게 나타난다. 이 성질을 이용하여 선형 소자는 물론이고, 비선형 소자도 탐지할 수 있게 된다. 또한, 원편파 안테나를 탐지에

이용함으로써 탐지된 소자로부터의 반사에 의한 편파의 손실을 최소화 할 수 있기 때문에 본 연구에서 원편파 특성을 가지는 스파이럴 안테나를 고려하였다.

일반적으로 Archimedean 스파이럴 안테나는 암의 너비(w)와 간격(s), 암 패턴의 반지름(r_{in} , r_{out}), 권선수(N) 등에 따라 공진 주파수 및 대역폭이 결정된다. 그림 2에 스파이럴 안테나의 암 패턴을 나타내었다. 안테나의 크기를 결정짓는 반지름 r_{in} 과 r_{out} 은 식 (1)과 같이 동작 주파수의 상한 주파수와 하한 주파수에 의해 결정될 수 있다^[10]. 여기서 c 는 빛의 속도이다.

$$r_{in} \leq \frac{c}{2\pi f_{high}}, \quad r_{out} \geq \frac{c}{2\pi f_{low}} \quad (1)$$

본 논문에서 r_{in} 과 r_{out} 의 크기를 정하기 위해 목표 주파수 대역인 상한 주파수(3 GHz)와 하한 주파수(0.8 GHz)를 식 (1)에 대입하여 구한다. 이때 $r_{in} \leq 19$ mm이고, $r_{out} \geq 59.6$ mm를 만족하여야 한다. 그러나 이것은 r_{out} 일 때, 암의 중심까지의 거리이므로 암 패턴의 폭을 고려하여 안테나 기관의 반지름은 75 mm로 결정하였다. 설계에서 안테나의 유전체 기판은 비유전율 2.1+j0.001의 Teflon 기판을 고려하였다. 유전율이 낮은 기판을 사용하여 관내 파장을 길게 유지하여 광대역 특성을 가지기 쉽도록 하였다. 안테나의 시뮬레이션 툴은 HFSS를 사용하였다.

그림 1. 다양한 디바이스에 의해 반사되는 고조파 특성

Fig. 1. Characteristics of harmonic frequency reflected by various devices.

그림 2. 스파이럴 안테나의 암 패턴
Fig. 2. An arm pattern of spiral antenna.

그림 3. Single-arm 스파이럴 안테나의 구조
Fig. 3. Structure of single-arm spiral antenna.

그림 3은 스파이럴 안테나의 구조를 나타낸다. 방사면에 단일 암 패턴의 형태를 구현하였다. 설계에 있어서 선로의 폭(w)을 0.6 mm, 선로의 간격(s)을 17 mm로 하였다. 하지만 방사면과 그라운드면이 임피던스 매칭이 되지 않고, 전류의 위상이 상쇄되어 설계 주파수 대역에서 공진이 발생하지 않는다. 이를 개선하기 위하여 그림 4처럼 그라운드면에 스파이럴 슬릿을 삽입한 구조를 제안하였다. 전류와 위상이 방사면과 동일한 방향으로 흐르도록 설계를 하였다. $w=8$ mm, $s=1$ mm로 하였다.

그림 5에는 그라운드면에 스파이럴 슬릿을 삽입한 그림 4의 안테나와 스파이럴 슬릿이 없는 그림 3 안테나의 S_{11} 을 계산한 결과를 보여주고 있다. 하지만 목표로 하는 반사 특성과 주파수 대역폭에 미치지 못하여 이의 개선 방안을 필요로 하게 되었다.

그림 4의 안테나를 살펴보면 방사면의 선로에서 급전선을 통해 전류가 중심부 방향으로 흘러가면, 중심부에서 전류가 방사하지 못하고 전반사된다. 이

그림 4. 그라운드에 스파이럴 슬릿을 삽입한 안테나 구조
Fig. 4. Antenna structure with spiral slit inserted in ground.

그림 5. 그라운드에 스파이럴 슬릿이 있을 때와 없을 때의 S_{11}
Fig. 5. Calculated S_{11} characteristic of spiral antenna with and without spiral slit ground.

것을 해결하기 위해 중심부에서 전류가 전반사하지 않고 모두 방사될 수 있는 소자를 설계할 필요가 있다. 따라서 그림 6과 같이 방사면의 중심부에 방사

그림 6. 스파이럴 안테나의 중심부에 위치한 방사 소자의 설계 구조
Fig. 6. Design structure of radiation element placed on center position of spiral antenna.

그림 7. 다양한 방사 소자의 구조에 따른 S_{11} 의 비교
Fig. 7. Comparison of the S_{11} by structure of various radiation elements.

소자를 설계하였다.

그림 6은 그림 5의 전류 전방사 문제를 개선하기 위해 스파이럴 안테나의 중심부에 방사 소자를 위치시켜 반사 손실을 개선하는 구조를 제안하였다. ①번은 그림 4의 구조로 선로만 있고, 방사부가 없어 그림 5와 같이 전방사가 일어나는 구조이다. ②번 설계는 중심부에 직사각형의 방사 소자를 삽입하여 전방사를 막고 방사가 잘 일어나도록 한 구조이다. 하지만 직사각형 구조로 인해 완전한 방사가 되지 못하고 선로상의 반사되어 오는 전류가 많아 송신 주파수 대역에서 -10 dB의 반사 손실을 만족하지 못하고 있으며, 수신 주파수 대역에서도 전체적으로 -10 dB를 만족하지 못하는 대역이 많이 나타나고 있다. ③번 설계는 방사부를 둥근 반원형으로 설계하여 전류의 반사를 줄이고, 임피던스 변화를 완만하게 하여 대역폭을 증가시킬 수 있도록 하였다.

그림 7은 그림 6의 방사 소자 구조들에 따른 S_{11} 의 이론적 계산 결과를 보여주고 있다. 그림 7로부터 알 수 있는 것처럼, 중심부에 위치한 둥근 반원형 방사 소자 구조의 ③번이 연구 목표에 가장 근접한 S_{11} 의 특성을 보였다. 따라서 ③번의 구조를 최적 설계 구조로 고려하였다. 그림 8은 그림 6의 ③번 방사 소자에 대한 목표 주파수에서의 이론적 방사 패턴을 나타내고 있다. 송신 주파수 대역 및 수신 주파수 대역 중심 주파수에서의 방사 패턴 및 이득, 원편파 특성을 알아보았다. 방사면이 있는 $-z$ 방향으로 원

그림 8. ③번 방사 소자 구조에 대한 계산된 방사 패턴

Fig. 8. Calculated radiation pattern for a radiated element structure of model ③.

편파 특성이 나타나고 있다. 0.9 GHz와 1.8 GHz에서는 약 4 dBi의 이득이 나오고, 2.7 GHz에서는 약 5 dBi의 이득 특성이 나오고 있다. 그림 8의 방사 패턴으로부터 알 수 있는 것처럼, 그림 4(b) 구조의 그라운드면은 그라운드의 역할이 아닌 안테나의 역할을 하여 다이폴 안테나의 무지향성 방사 패턴이 얻어짐을 알 수 있다. 스파이럴 안테나를 탐지용으로 설계하기 위해서는 방사 패턴을 무지향성이 아닌 지향성을 가지는 안테나로 설계할 필요가 있다. 따라서 그림 9와 같이 그라운드와 일정 거리를 가지는 위치에 반사판과 같은 역할을 하는 금속 캡 및 전파의 누설 방지와 그라운드면과 금속 캡 사이의 높이 유지를 위한 캐비티 벽을 설계하였다.

그림 9는 그라운드면에 탐지율을 높이기 위한 목적으로 캐비티 벽을 세워 메탈 캡으로 덮은 스파이럴 안테나를 나타낸다. 따라서 전파의 방사 진행 방향은 $-z$ 축 방향이 된다. 캐비티 벽의 높이와 크기를 최소화하기 위해 그림 9에서 보는 바와 같이 안테나 패턴이 있는 기판보다도 복소 비유전율이 큰 $4.4 + j0.02$ 인 Fr4-epoxy를 설계에 고려하였다.

그림 9. 캐비티 벽과 금속 캡을 이용한 스파이럴 안테나 구조

Fig. 9. Spiral antenna structure using metal cap and cavity wall.

그림 10. 캐비티 벽과 금속 캡이 있을 때와 없을 때의 S_{11} 특성

Fig. 10. Calculated S_{11} characteristics of spiral antenna with and without metal cap and cavity wall.

그림 10에서처럼, 두께가 0.4 mm, 높이는 33 mm의 파라미터 값일 때, 가장 양호한 S_{11} 특성을 나타내었다. 캐비티 벽이 그라운드면 위에 새워져 있기 때문에 캐비티 벽 겉면에 동박이 있을 시 그라운드가 바깥면에도 연결되어 누설되는 전류가 발생할 수도 있다. 따라서 겉면의 동박을 제거하고, 안쪽면만 동박을 입힘으로써 전류가 겉으로 나가지 못하고 그라운드로 접지가 되어 그라운드가 커지는 효과가 있다. 그리고 금속 캡과 캐비티 벽 내에서만 전파가 존재하도록 하여 전파의 방사를 최소화하였다. 그림 10에 캐비티 벽과 금속 캡을 사용했을 때와 하지 않았을 때의 S_{11} 특성을 나타내었다. 캐비티 벽과 메탈 캡을 사용하였을 때 반사 손실의 레벨이 구간별로

그림 11. 캐비티 벽과 금속 캡을 가진 안테나의 계산된 방사 패턴

Fig. 11. Calculated radiation pattern of spiral antenna with cavity wall and metal cap.

차이가 있지만 평균 약 4 dB 정도의 반사 손실 개선이 있었다. 그리고 수신 주파수 2nd harmonic과 3rd harmonic 대역에서 -10 dB의 반사 손실을 만족하고, 전체 설계 목표 대역에 걸쳐, 최소 -6 dB의 기준을 만족하여 상용화 제품들에서 요구하는 기준을 만족하고 있다.

그림 11에 캐비티 벽과 금속 캡을 가진 스파이럴 안테나의 계산된 방사 패턴을 나타내었다. 그림 11의 방사 패턴을 그림 8의 캐비티 벽과 금속 캡을 사용하지 않은 스파이럴 안테나의 방사 패턴과 비교하여 보면, -z 방향으로 지향성이 발생한다.

그림 8에서 보는 것처럼, $\pm z$ 방향으로 방사되던 에너지들이 캐비티 벽과 금속 캡의 사용에 의해, 그림 11에서처럼, -z 방향으로 에너지가 집중되는 현상이 나타난다. 0.9 GHz에서는 이득이 약 7 dBi로 무지향성일 때보다 3 dBi 정도 증가하였다. 1.8 GHz에서는 약 8 dBi로 증가하였고, 2.7 GHz에서는 5 dBi의 이득을 가졌다. 지향성 설계를 통하여 전체적인 이득이 증가하였다. 또한, 그림 11로부터 알 수 있는 것처럼 -z축 방향의 축비가 $\pm 45^\circ$ 까지 0.9 GHz와 1.8 GHz에서 0.3 dB 이내를 나타냄으로써 완전한 원편

파가 방사되는 것으로 나타났다. 2.7 GHz에서는 약간의 뒤틀림 현상이 나타나고 있지만 2 dB 이내로 축비가 계산되었다.

III. 제작 및 측정

설계한 안테나의 신뢰성 확인을 위해 안테나를 실제로 제작하여 측정을 하였다. 제작된 안테나의 반사 손실 및 대역폭 측정은 Anritsu사의 Vector network analyzer 37369D를 사용하였다. 안테나의 지향성 이득 및 방사 패턴 측정은 16 m×8 m×6 m 크기의 전파 암실을 사용하였다. 안테나의 기판은 Teflon 기판을 사용하였고, 캐비티 벽은 Fr4-epoxy 기판을 사용하였다. 그림 12에 제작된 안테나의 사진을 나타내었다. 급전부에 50 [Ω] port를 연결시켜 Network analyzer로 측정하였다. 그림 13에 측정된 S_{11} 과 시뮬레이션의 S_{11} 을 비교하였다. 제작된 안테나의 S_{11} 이 시뮬레이션의 S_{11} 과 비교하여 특성이 좋게 나타났다. 이것은 HFSS 시뮬레이션이 mesh 해석 기법을 사용하기 때문에 스파이럴의 해석에 있어서 완벽한 설계를 할 수 없어서 오차가 발생되었다고 판단된다. 제작에 있어서는 스파이럴의 선로가 정확한 원으로 만들어져서 선로간의 임피던스 매칭이 완벽하게 되어 수신대역에 있어서 시뮬레이션보다 S_{11} 의 개선이 나타나는 것으로 사료된다. 하지만 전반적인 S_{11} 의 변화 경향은 잘 일치하고 있다.

그림 14에 사용 대역폭의 중심 주파수별 방사 패턴을 측정하여 나타내었다. 그림 11의 시뮬레이션 방사 패턴 결과와 동일하게 방사면이 -z축 방향으로 지향하고 있고, 원편파의 특성을 나타내고 있다. 따라서 0.9 GHz에서는 5.15 dBi, 1.8 GHz에서는 6.15 dBi, 2.7 GHz에서는 4.15 dBi의 이득을 가진다. 송수

그림 12. 제작한 안테나의 사진
Fig. 12. Photograph of a fabricated antenna.

그림 13. 측정값과 시뮬레이션의 S_{11} 비교
Fig. 13. Comparison of the simulated and measured S_{11} .

그림 14. 측정된 방사 패턴
Fig. 14. Measured radiation pattern.

신 주파수 대역에서 축비는 -z축 방향으로 $\pm 45^\circ$ 의 범위에서 0.9 GHz와 1.8 GHz에서는 약 0.3 dB 이내로 측정되었으며, 2.7 GHz에서는 약간 뒤틀림 현상이 일어나 약 2 dB 정도의 구간도 있으나 계산값과 잘 일치하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비선형 소자를 탐지할 목적으로

고이득을 가지는 스파이럴 안테나를 제안하였다. 다중 대역을 설계하기 위해 방사면에 방사 소자와 스파이럴의 권선수를 증가시키고, 그라운드면에서도 스파이럴 슬릿을 사용하였다. 또한, 안테나의 지향성과 이득을 높이기 위해 캐비티 벽과 금속 캡을 제안하였다. 그 결과, 이득은 약 3 dB 정도 개선되었으며, $-z$ 축 방향으로의 지향 특성도 시뮬레이션과 잘 일치하였다. 축비도 $-z$ 축 방향을 기준으로 $\pm 45^\circ$ 의 범위에서 0.3 dB 이내로 원편파의 특성을 잘 만족하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Hiltmar Schubert, Andrey Kuznetsov, *Detection and Disposal of Improvised Explosives - NATO Security through Science Series*, Springer, pp. 237-239, 2006.
- [2] 전남두, 신동훈, 박동철, "0.5~2 GHz 캐비티 백 스파이럴 안테나 설계", 한국전자과학회논문지, 21(3), pp. 269-277, 2010년 3월.
- [3] 조정래, 박진오, 유병석, 정운섭, 정우성, 박동철, "2~18 GHz 광대역 캐비티 백 스파이럴 안테나 설계", 한국전자과학회논문지, 19(10), pp. 1166-1174, 2008년 10월.
- [4] V. H. Rumsey, "Frequency independent antenna", *IRE National Convention Record*, Pt. 1, pp. 114-118, Mar. 1957.
- [5] W. L. Curtis, "Spiral antenna", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 8, pp. 298-306, May 1960.
- [6] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Wiley, pp. 309-329, 2004.
- [7] Julius A. Kaiser, "The archimedean two-wire spiral antenna", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 8, pp. 312-323, May 1960.
- [8] 김명기, 오대영, 박익모, "다양한 복사 패턴을 가지는 이중대역용 다기능 마이크로스트립 스파이럴 안테나", 대한전자공학회논문지, 40(11), pp. 77-84, 2003년 10월.
- [9] 윤영, RF 능동회로, 홍릉과학출판사, pp. 393-482, 2005년.
- [10] Eric D. Caswell, "Design and analysis of star spiral with application to wideband arrays with variable element size", *Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State Univ.*, Dec. 2001.

김 태 근

2009년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] MDM(Magneto-Dielectric Material), UWB 소형 안테나, 광대역 Spiral 안테나 설계 등

민 경 식

1989년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1991년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1996년 2월: 일본동경공업대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] FDTD 해석법 및 프로그램 개발, RFID, MDM(Magneto-Dielectric Material), MIMO 안테나, 위성 통신 및 이동 통신용 안테나 설계 등

이 광 근

2000년 2월: 동의대학교 기계공학과 (공학사)

2009년 3월~현재: 한국해양대학교
전파공학과 석사과정

2000년 1월~2005년 12월: (주)사라
콤부설연구소 연구원

2006년 1월~2008년 3월: (주)사라

콤 IT 사업부 과장

2008년 3월~현재: (주)한샘 기술연구소 과장

[주 관심분야] 광대역 Spiral 안테나 설계