

Cartesian Feedback Loop 선형화 기법을 적용한 초단파 데이터 교환 시스템 (VDES) 송신기 설계 및 제작

김재현[°], 김용덕^{*}, 김용기^{*}, 김준태^{**}

Design and Fabrication of VHF Data Exchange System (VDES) Transmitter Using Cartesian Feedback Loop Linearization Technique

Jae-heon Kim[°], Yong-duk Kim^{*}, Yong-ki Kim^{*}, Jun-tae Kim^{**}

요약

본 논문에서는 국제항로표지협회(International Association Of Lighthouse Authorities, IALA)를 중심으로 논의되고 있는 e-Navigation 전략 이행계획의 일부인 초단파 데이터 교환 시스템(VHF Data Exchange System, VDES)의 송신기에 대해 기술하였다. VDES의 표준 권고안 중 송신출력 스펙트럼 마스크 규격은 인접한 채널 간의 간섭을 최소화하기 위해 엄격한 규격을 적용하고 있다. 본 논문에서는 이를 충족시키기 위한 송신기의 선형화 기법에 대해 기술하고 이러한 기법 중 초단파 대역(Very High Frequency, VHF)의 협대역 채널에 적합한 Cartesian Feedback Loop 선형화 방식의 송신기를 설계 및 제작하였다. 제작된 송신기를 통해 VDES 주파수 대역에서 응용지정메시지(Application Specific Message, ASM) 채널과 초단파 데이터 교환(VHF Data Exchange, VDE) 채널의 Modulation Coding Scheme(MCS)별 송신출력 스펙트럼 마스크를 측정하였다. 측정결과 국제항로표지협회에서 권고하는 규격을 만족하였으며, 선형화 기법을 사용하지 않은 경우에 비해 상호변조왜곡(Inter Modulation Distortion, IMD) 성분이 약 30dBc 이상 억제됨을 확인하였다.

Key Words : VDES, Cartesian Feedback Loop, Linear power amplifier, Spectrum mask, e-navigation

ABSTRACT

In this paper, we describe the transmitter of the VHF Data Exchange System (VDES), which is part of the e-Navigation Strategy Implementation Plan, which is currently being discussed around the International Association of Lighthouse Authorities(IALA). In the VDES recommendation, the spectral mask specification of transmitter has a strict specification to minimize interference between adjacent channels. In this paper, we describe the linearization technic of transmitter to meet this requirement and design and fabricated a transmitter using Cartesian Feedback Loop technic. Through the fabricated transmitter, we measured the spectrum mask of the transmitter output of each Modulation Coding Scheme (MCS) of the Application Specific Message (ASM) channel and the VHF Data Exchange (VDE) channel in the VDES frequency band. As a result of the

* 본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원과 한국형 e-Navigation 사업단의 지원을 받아 수행된 'IMO 차세대 해양안 전종합 체계 기술개발' 연구 결과 중 일부입니다.

[°] First and Corresponding Author: Ace antenna Co. Ltd., jhoney@aceantenna.co.kr, 정희원

^{*} Ace antenna Co. Ltd., ydkim@aceantenna.co.kr; yongki@aceantenna.co.kr

^{**} Korean Register Co. Ltd., jtkim@krs.co.kr

논문번호 : 201911-286-A-RU, Received November 1, 2019; Revised November 28, 2019; Accepted December 3, 2019

measurement, it satisfies the standard recommended by the IALA and confirmed that it suppressed the Inter-Modulation Distortion (IMD) component by about 30dBc compared to the case of not using the linearization technique.

I. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 2006년 선박 운항자의 과실에 의한 해양사고 저감 및 해운 효율화 증진을 위해 선박 운항 기술에 정보통신기술(Information and communication technologies, ICT)을 융합한 e-Navigation 도입을 결정하였으며, 2014년 전략계획의 체계적 이행과 국제적 시행을 위한 e-Navigation 전략 이행계획을 승인하였다.

초단파 데이터 교환 시스템(VHF data exchange system, VDES)은 e-Navigation 전략 이행계획의 일환으로 IMO에서 선박 자동식별 장치(Automatic Identification System, AIS)의 초단파 대역(Very High Frequency, VHF) 채널 과부하 문제를 장기적으로 해결하기 위해 제안되었으며, e-Navigation 서비스 제공을 위해, 보다 높은 통신 속도와 데이터 전송이 가능한 차세대 해상 디지털 기술로서 국제항로표지협회(International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, IALA)를 중심으로 표준화 작업이 진행되고 있다. VDES의 국제 표준은 2015년 승인된 국제통신연합(International Telecommunication Union)의 권고서 ITU-R M.2092-0을 따르고 있으며, IALA에서 e-Navigation 전략 이행계획을 주도하고 있는 ENAV 위원회는 후속 VDES 국제표준 개정 초안에 대한 개발 작업을 진행 중에 있고, 이와 관련하여 현재 논의되고 있는 기술 사양서 세부내용을 가이드라인 문서 G.1139를 통해 외부에 공개하여 지속적으로 업데이트하고 있으며, 향후 2020년 ITU-R 권고서 2092-1에 대한 승인을 추진하고 있다¹⁾.

VDES는 기존의 선박에서 사용되는 AIS 채널에 대한 과부하 문제를 해결하기 위해 응용지정메시지(Application specific message, ASM) 채널과 데이터 통신을 위한 VHF 데이터 교환(VHF data exchange, VDE) 채널을 할당하여 선박의 운항 및 주변 상황에 대해 더 많은 정보를 주고받을 수 있도록 한다²⁾.

II. 시스템 모델

그림 1은 VDES 시스템의 운용개념을 도식한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 해안국과 선박국간, 선박국과 선박국간 및 선박국과 위성국간에 통신 채널을 할당하였다.

VDES 시스템에 새로 할당된 ASM 채널과 VDE 채널은 그림 2와 같이 기존 AIS 채널뿐만 아니라 할당된 채널이 서로 인접하여 채널 간 Interference를 일으키기 쉬우며, 이로 인해 IALA에서 권고하는 ASM 채널과 VDE 채널에서의 스펙트럼 마스크 규격은 인접 채널에 영향을 최소화하기 위하여 채널 신호대비 현저히 낮은 마스크 규격을 권고하고 있다.

이에 본 논문에서는 IALA에서 권고하는 ASM과 VDE 채널에서의 스펙트럼 마스크를 만족하기 위한 기술적인 방법을 제시하고 시제품을 설계 및 제작하여 시험을 통해 성능을 검증하였다.

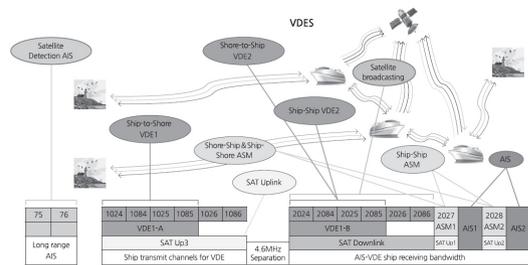


그림 1. VDES 운용 및 주파수 사용
Fig. 1. VDES functions and frequency usage

VDE Rec.ITU-R M.2092						VDE Rec.ITU-R M.2092						ASM1	AIS1	ASM2	AIS2		
1024	1084	1025	1085	1026	1086	2024	2084	2025	2085	2026	2086	2027	2087	2028	2088		
157.200	157.225	157.250	157.275	157.300	157.325	161.800	161.825	161.850	161.875	161.900	161.925	161.950	161.975	162.000	162.025		
VDE-TER Ship to shore (VDE1-A)						VDE-TER Shore to ship, ship to ship (VDE1-B)						AIS/ASM					

그림 2. VDES 주파수 계획
Fig. 2. VDES frequency plan

2.1 VDES 스펙트럼 마스크

앞서 언급한 바와 같이 세계전파통신회의(World Radio communication Conference, WRC) 15에서 할당된 VDES의 주파수 대역은 기존 AIS 서비스 대역 및 상호채널 간 주파수가 인접하여 운용 시에 채널 간

간섭을 일으킬 가능성을 내포하고 있다.

이에 IALA에서는 ITU-R M.2092-0에서 최초 권고한 VDES의 스펙트럼 마스크 권고안보다 규격을 더욱 강화하여 VDES 기술사양서인 IALA 가이드라인 G.1193 ed.3에 포함하였으며, 해당 가이드라인은 ITU-R M.2092-1 초안의 바탕이 될 전망이다.

VDES에 할당된 주파수 Plan은 그림 2와 같으며 현재 지상파 VDES는 주파수 할당이 이미 완료된 반면 위성 VDE 주파수는 WRC-19에서 주파수 할당 논의가 이루어질 예정이다.

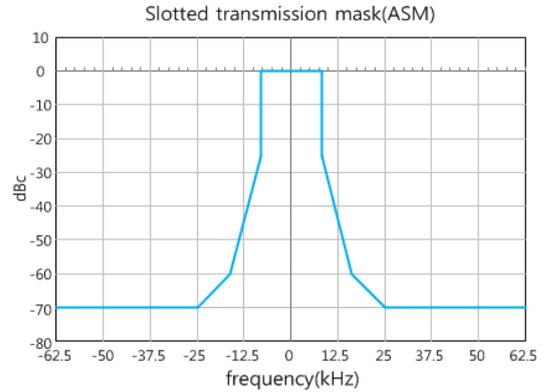
ASM 채널과 VDE 채널의 스펙트럼 마스크 규격은 표 1, 표 2와 같으며 ASM은 채널 대역폭이 16kHz인 반면 VDE는 MCS(Modulation coding scheme)별로 채널대역폭이 각각 25kHz, 50kHz, 100kHz이며 각각의 대역폭에 대한 스펙트럼 마스크 규격을 가진다.

표 1. ASM 스펙트럼 마스크 규격
Table 1. ASM spectrum mask specification

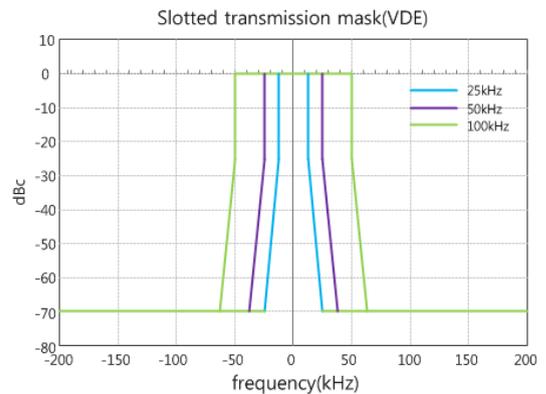
ASM	<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta f_c < \pm 8 \text{ kHz}$: 0 dBc • $\pm 8 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 16 \text{ kHz}$: below the straight line between -25dBc at $\pm 8 \text{ kHz}$ and -60 dBc at $\pm 16 \text{ kHz}$ • $\pm 16 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 25 \text{ kHz}$: below the straight line between -60dBc at $\pm 16 \text{ kHz}$ and -70 dBc at $\pm 25 \text{ kHz}$ • $\pm 25 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 62.5 \text{ kHz}$: -70 dBc
-----	---

표 2. VDE 스펙트럼 마스크 규격
Table 2. VDE spectrum mask specification

25 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta f_c < \pm 12.5 \text{ kHz}$: 0 dBc • $\pm 12.5 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 25 \text{ kHz}$: below the straight line between -25dBc at $\pm 12.5 \text{ kHz}$ and -70 dBc at $\pm 25 \text{ kHz}$ • $\pm 25 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 62.5 \text{ kHz}$: -70 dBc
50 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta f_c < \pm 25 \text{ kHz}$: 0 dBc • $\pm 25 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 37.5 \text{ kHz}$ below the straight line between -25 dBc at $\pm 25 \text{ kHz}$ and -70 dBc at $\pm 37.5 \text{ kHz}$ • $\pm 37.5 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 125 \text{ kHz}$: -70 dBc
100 kHz	<ul style="list-style-type: none"> • $\Delta f_c < \pm 50 \text{ kHz}$: 0 dBc • $\pm 50 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 62.5 \text{ kHz}$: below the straight line between -25 dBc at $\pm 50 \text{ kHz}$ and -70 dBc at $\pm 62.5 \text{ kHz}$ • $\pm 62.5 \text{ kHz} < \Delta f_c < \pm 250 \text{ kHz}$: -70 dBc



(a) ASM



(b) VDE

그림 3. ASM,VDE 스펙트럼 마스크
Fig. 3. ASM, VDE spectrum mask

그림 3은 표 1과 표 2에 기술된 스펙트럼 마스크 규격을 그래프로 나타내었으며, 0dBc의 기준은 채널의 평균 전력 레벨이다. 또한 스펙트럼 마스크 측정 시 Resolution bandwidth는 300Hz를 기준으로 한다^[3].

위의 스펙트럼 마스크를 만족하기 위해서는 전력증폭기의 Back-off 마진이 큰 전력증폭소자를 사용하는 방법과 선형화 기법을 적용하는 방법이 있는데, Back-off 마진이 큰 증폭소자를 사용하는 경우 전력 효율이 떨어지고 비용이 증가하는 단점이 있다.

2.1.1 전력증폭기 선형화 기법

무선 시스템에서 전력증폭기는 송신출력, 효율, 선형성, 대역폭 등의 여러 가지 성능 지표를 가지고 있다. 이 중 데이터 신호의 왜곡을 최소화하고 인접채널에 대한 간섭을 피하기 위해 선형성 지표가 중요한 요소이다. 증폭기의 선형성 지표를 향상시키기 위해서는 전력용량이 큰 증폭 소자를 사용함으로써 해결할 수 있지만, 이는 앞서 말한 바와 같이 전력효율과 비용증

가의 문제가 있다.

이와 같은 문제점으로 인하여 전력증폭기를 설계함에 있어 여러 가지 선형화 기법들이 적용되는 데 Feed-forward 방식, Pre-distortion 방식, Cartesian feedback loop 방식 등이 있다. 이러한 선형화 기법들 중 본 논문에서는 Cartesian feedback loop 선형화 기법을 이용하여 전력증폭기의 선형성을 향상시키고 이를 통해 스펙트럼 마스크 규격을 만족할 수 있도록 하였다.

2.1.2 Cartesian Feedback Loop

전력증폭기의 선형성을 향상시키기 위한 여러 가지 방법 중 Cartesian feedback loop 기법은 1970년대 초부터 시작되었다. 이 방식은 입력되는 Baseband I,Q 신호와 전력증폭기의 비선형 특성에 의해 왜곡된 출력신호의 Feedback 신호를 비교하고 이를 보정하여 전력증폭기의 선형성을 향상시킨다^[4].

Cartesian feedback loop 전력증폭기의 일반적인 블록도는 다음 그림 4와 같다.

Cartesian feedback 시스템은 Baseband에서 90도의 위상 차이를 갖는 변조된 I,Q 신호가 보정증폭기에 입력되고 국부발진기와 혼합되어 반송파 신호로 상향 변환된 후 이를 전력증폭기를 통해 증폭된다. 이 신호 중 결합기에 의해 일부 결합된 신호가 국부발진기 신호와 혼합하여 Baseband로 하향 변환되어 보정증폭기에 입력된다. 보정증폭기에 입력되는 기준입력 I,Q 신호와 재환된 I,Q 신호의 비교를 통해 위상 오차를 검출하고 검출된 위상오차를 보정함으로써 선형성을 확보한다. Cartesian feedback loop 방식은 주로 협대역 신호에 대하여 선형성 개선 특징을 보인다^[5].

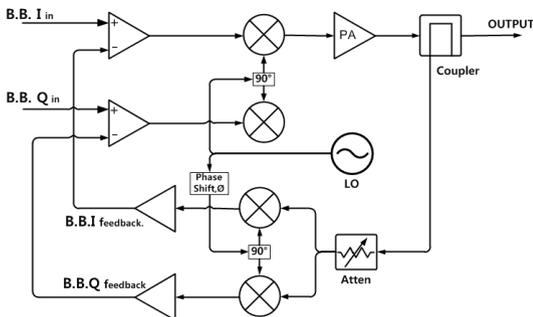


그림 4. Cartesian feedback 블록도
Fig. 4. Cartesian feedback Block Diagram

III. 설계 및 제작

VDES를 구성하는 AIS, ASM 그리고 VDE 채널에 대한 송신출력은 AIS의 경우 ITU-R M.1371 권고안에 정의되어 있으며, ASM과 VDE의 경우 G.1139 Ed.3에서 표 3과 표 4와 같이 권고되었다.

표 3에서와 같이 ASM 채널의 경우 Low setting과 High setting으로 구분되며 각각 1W, 12.5W의 송신출력 규격을 가진다. VDE 채널은 표 4와 같이 Link ID에 따라 채널대역폭 25kHz, 50kHz, 100kHz에서 각각 12.5W, 11W, 6.5W의 송신출력 규격을 가진다.

위와 같은 송신출력 규격을 만족하기 위하여 송신기의 전력 증폭소자로 전치증폭기와 주증폭기로 구성하여 설계하였으며 전치증폭기에 사용된 소자는 Mitsubishi 사의 6W급 증폭소자인 RA07M1317M1을 사용하였고 주증폭기의 소자는 Macom사의 80W급 증폭소자인 MRF-173을 사용하였다. 또한 Cartesian feedback loop의 기본 구성이 집적회로 형태로 제작된 CML Microcircuit 사의 CMX998 소자를 사용하여 선형화 회로를 적용하였다. 국부발진기는 전압제어발진기가 내장된 위상고정 루프 (Phase Lock Loop, PLL) 소자를 통해 생성하여 인가하였다.

그림 5와 같이 Cartesian Feedback Loop 송신기의 회로의 구성은 CMOS 소자 형태로 제작된 CMX998 소자 및 주변회로, 전치증폭기, 주증폭기, 결합기, 국부

표 3. ASM Transmitter Power Specification
Table 3. ASM Transmitter Power Specification

Parameter name	Low setting	High setting
Channel BW (kHz)	16	
Modulation	$\pi/4$ QPSK	
Transmit output power	1	12.5

표 4. VDE Transmitter Power Specification
Table 4. VDE Transmitter Power Specification

Link Config. ID	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Channel BW[kHz]	25			50			100		
Modulation	$\pi/4$ QPSK	8 PSK	16 QAM	$\pi/4$ QPSK	8 PSK	16 QAM	$\pi/4$ QPSK	8 PSK	16 QAM
Minimum Output average power[W]	12.5	11	6.5	12.5	11	6.5	12.5	11	6.5

발전기 그리고 제어부로 구성되어 있다. 송신기의 선형성 개선은 CMX998 소자 내부의 위상 보정과 전치 감쇄기 및 케환감쇄기등의 설정값을 제어부의 MCU(Micro controller unit)가 SPI(Serial peripheral interface) 통신을 통해 CMX998 소자내의 레지스터에 기록하여 조정할 수 있으며 이 값은 MCU 내부 플래시 메모리에 저장되어 전원이 꺼졌다가 재 인가될 때 마다 CMX998의 레지스터에 기록한다.

위와 같은 구성으로 제작된 송신기 모듈은 그림 6과 같으며 신호발생기로부터 peak to peak 500mV의 아날로그 Baseband I,Q 신호를 입력하고, 외부 기준 신호 10MHz를 인가하여 VCO가 내장된 PLL로부터 LO 신호를 생성하였다.

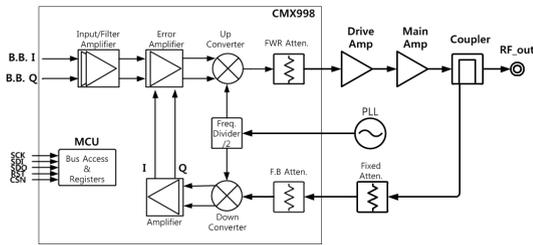


그림 5. Cartesian feedback loop 송신기 블록다이어그램
Fig. 5. Cartesian feedback loop transmitter block diagram



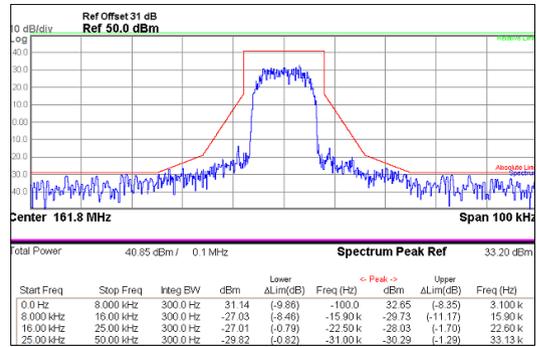
그림 6. 제작된 Cartesian feedback loop 송신기
Fig. 6. Developed Cartesian feedback loop transmitter

IV. 측정 결과

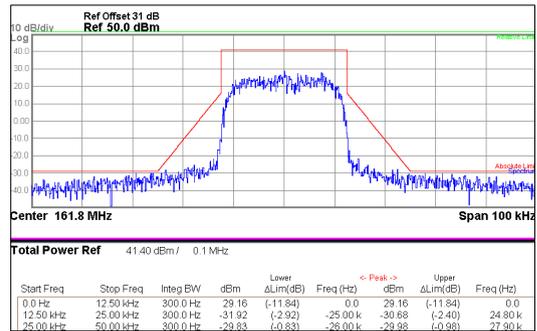
그림 7은 ASM과 VDE의 송신출력 전력 및 스펙트럼 마스크를 Keysight사의 N9020A 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정한 결과이다. ASM은 ASM1 채널에 대하여 측정하였으며, VDE는 Link ID 11번, 15번, 19번에 대하여 측정하였다.

측정결과 ASM 채널과 VDE 채널 모두 IALA에서 권고하는 G.1139 Ed. 3의 스펙트럼 마스크 규정을 충족하는 결과를 볼 수 있었다.

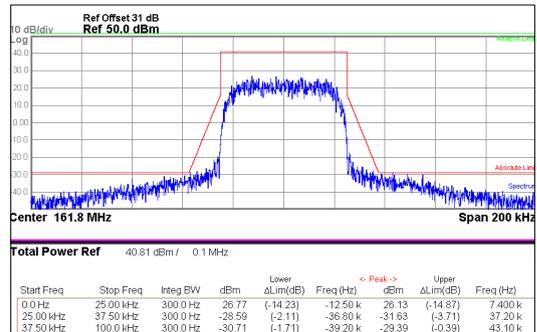
그림 8은 선형화 기법이 적용되었을 때와 적용되지



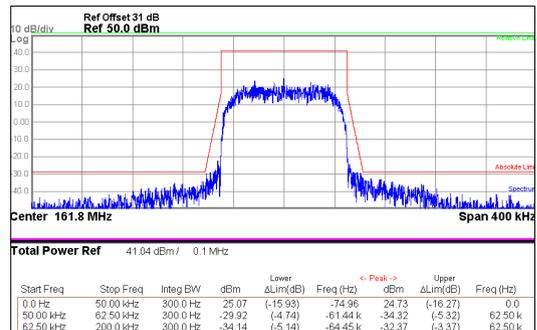
(a) ASM ($\pi/4$ QPSK, BW: 16 kHz)



(b) VDE ($\pi/4$ QPSK, BW: 25 kHz)



(c) VDE (8PSK, BW: 50 kHz)



(d) VDE (16QAM, BW: 100 kHz)

그림 7. 선형화 회로 적용 후 송신 출력
Fig. 7. Transmit Power applied linearizer

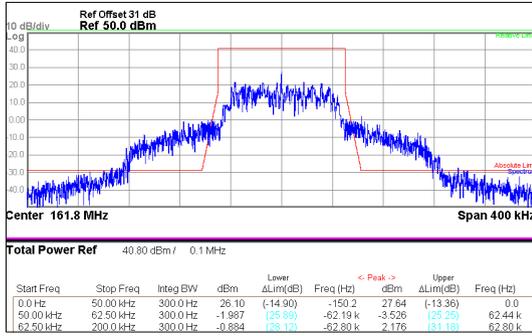


그림 8. 선형화 회로가 적용되지 않은 송신 출력
Fig. 8. Transmit power for non applied linearizer

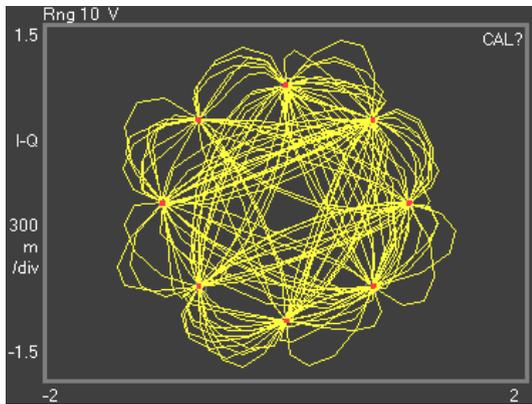
않았을 때의 차이를 확인하기 위하여 신호발생기에서 161.8MHz의 VDE link ID 19번 신호를 생성하여 이를 전치증폭기와 주증폭기에 의해 증폭된 출력을 측정하였다.

선형화 기법이 적용되지 않았을 경우 3차 상호변조

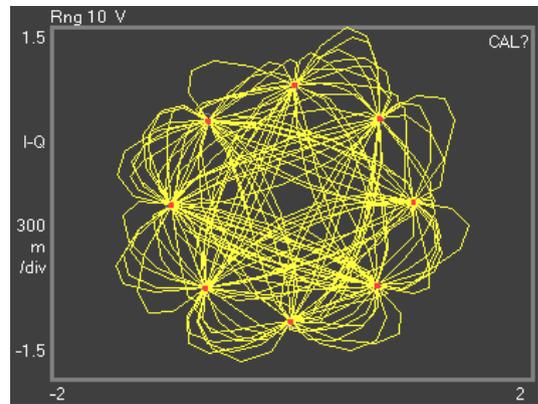
왜곡(Inter modulation distortion, IMD)성분이 주 신호대비 높은 비율로 발생하는 것을 확인할 수 있었으며. 이를 그림 7(d)와 비교하면 선형화 기법을 적용하였을 경우 약 30dBc 정도의 IMD개선 효과를 확인할 수 있다.

그림 9는 Keysight사의 신호분석 프로그램인 VSA89600 계측기를 이용하여 그림 7과 같이 측정된 송신출력의 모듈레이션 정상도를 측정한 결과이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 정상점의 분포가 각각의 점에 집중되어 있으며, 함께 측정된 오류벡터치(Error vector magnitude, EVM)은 모듈레이션별로 1.5% ~ 2.0%로 측정되었다.

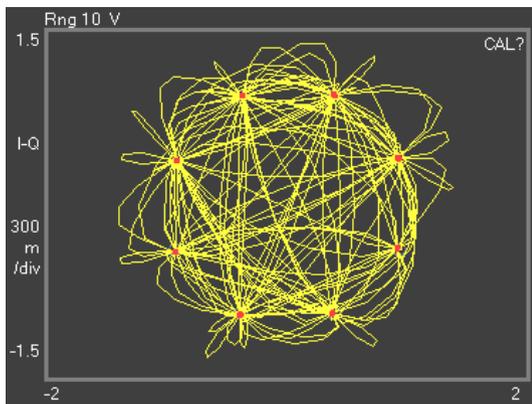
표. 5는 앞서 측정된 송신기의 측정결과를 정리하였다. ASM1 채널과 VDE Link ID 11번, 15번, 19번 채널 모두 스펙트럼 마스크 권고안에 충족됨을 알 수 있다.



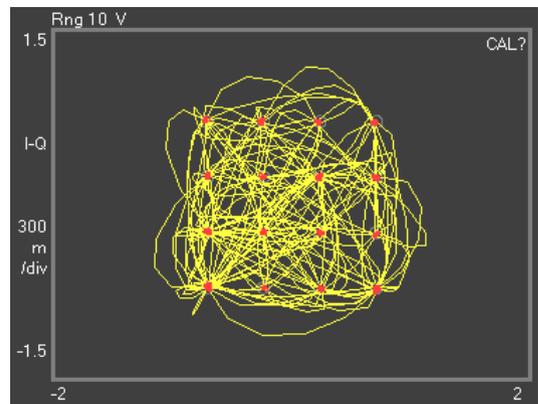
(a) ASM ($\pi/4$ QPSK, BW: 16 kHz)



(b) VDE ($\pi/4$ QPSK, BW: 25 kHz)



(c) VDE (8 PSK, BW: 50 kHz)



(d) VDE (16 QAM, BW: 100 kHz)

그림 9. 송신출력 정상도
Fig. 9. Constellation Diagram of Transmitter output

표 5. 측정결과
Table 5. Measurement result

Parameter	ASM1	VDE (11)	VDE (15)	VDE (19)
Tx power [dBm]	40.85	41.40	40.81	41.04
Spectrum Mask Margin [dB]	0.79	0.83	1.71	3.37
EVM [%]	1.5413	1.5739	1.6808	1.9007

V. 결 론

본 논문에서는 국제항로표지협회를 중심으로 표준화 작업이 진행 중인 VDES 해상통신 시스템의 권고안 중 VDES 송신기의 송신 스펙트럼 권고안을 만족하기 위한 Cartesian Feedback Loop 방식의 선형화 구조 및 적용 방식에 대해 연구하고 이를 설계 및 제작하여 실험 결과를 측정하였다. 측정결과 선형화 구조를 적용하지 않았을 때에 비해 약 30dBc의 IMD 성분이 억제된 것을 확인 할 수 있었으며 국제항로표지협회의 권고안을 만족하였다.

따라서 본 논문에서 기술한 Cartesian feedback Loop 선형화 기법의 송신기 구조가 향후 VDES 통신 시스템에 적합한 모델로 적용될 수 있다.

References

- [1] J. H. Yoo, J. T. Kim, and G. M. Park, "Next generation maritime wireless communication technology and standardization trend," *TTA J.*, vol. 179, pp. 51-52, 2018.
- [2] IALA, *VHF Data Exchange System (VDES) Overview*, G1117, 2nd Ed., pp. 8-11, 2017.
- [3] IALA, *The Technical Specification of VDES*, G1139, 3rd Ed., pp. 43-49, 2019.
- [4] J. L. Dawson and T. H. Lee, "Automatic phase alignment for a fully integrated cartesian feedback power amplifier system," *IEEE J. Solid-State Circuit*, vol. 38, no. 12, pp. 2269-2279, 2003.
- [5] A. Holbel, F.-P. Hsu, and C. Zhai, "RF transmitter with cartesian feedback," University of michigan EECS 522 Final Project, 2009.

김 재 현 (Jae-heon Kim)



2001년 8월: 충북대학교 전파공학과 졸업
2003년 8월: 충북대학교 전파공학과 석사
2011년 12월~현재: (주) 에이스안테나 연구위원

<관심분야> 전파공학, 초고주파 능동회로, 해상무선통신, 레이더 시스템

[ORCID:0000-0001-7135-9916]

김 용 덕 (Yong-duk Kim)



1996년 2월: 서울과학기술대학교 전자공학과 졸업
2011년 2월: 연세대학교 전파공학과 석사
2018년 2월~현재: (주) 에이스안테나 연구위원

<관심분야> 초고주파 능동회로, 이동통신, 해상무선통신
[ORCID:0000-0001-7080-5806]

김 용 기 (Yong-ki Kim)



1992년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 졸업
1994년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 석사
2015년 9월~2018년 2월: (주) 에이스안테나 연구소장
2018년 2월~현재: (주) 에이스안테나 대표이사

<관심분야> 해상무선통신, 이동통신 시스템
[ORCID:0000-0002-5090-1830]

김 준 태 (Jun-tae Kim)



2006년 2월 : 서울시립대학교 전

자전기컴퓨터공학부 학사

2006년 4월~현재 : (사) 한국선

급 책임검사원

<관심분야> 해상통신, e-Naviga-

tion, 선박자동화시스템

[ORCID:0000-0002-1410-2433]