
고속 전송선로의 신호왜곡과 신호 보전에 관한 연구

장연길* · 이영철**

A Study on the Signal Integrity and Distorted Signal Analysis of High Speed Transmission Line

Yeon-Gil Jang* · Young-Chul Rhee**

요 약

본 논문은 외부 영향에 의하여 고속 정보시스템의 모듈사이에서 발생하는 전송잡음과 왜곡신호에 대한 신호 보전의 방법에 대하여 제안하였다. 고속 전송선로의 왜곡효과를 제거하기 위하여 전송선로 임피던스 정합에 의한 신호보전(signal integrity)은 고속 동작에 따른 전송선로효과 발생조건을 ADS로 모델링한 후 최적의 임피던스 정합을 단선 및 차동인터페이스 방식으로 구분하였다. 실험한 결과, 고속 정보통신시스템에 따르는 신호지연을 고려하여 최적의 단자 임피던스 값을 정합시켜 고속 신호의 최적 보전이 가능함을 보여 주었다.

ABSTRACT

In this paper, we suggested the method of signal integrity for noises and distortion signal generated between high speed information transmission modules by external effects. Suggested method for signal integrity of impedance matching to remove transmission line distortion, We divided the impedance matching between the transmitter and the receiver module with the single line and differential line methods after confirmed the improvement of signal distortions through ADS simulation. the experimental results indicated that it is possible to keep signal integrity without signal distortions by matching the optimal termination impedance which are considering the signal delay of transmission line for using the high-performance modules.

키워드

signal integrity, signal distortion, transmitter line effect, optimum impedance
신호 보전, 신호 왜곡, 전송 선로 효과, 최적 임피던스

1. 서론

정보통신시스템의 정보처리 속도가 증가함에 따라 고속시스템의 내부회로에서 정보를 주고받는 모듈사이에 온도영향 등 물리적인 외부 요인으로 제어신호의 불안정 현상으로 이어지며 이로 인해 전송선로에 신호왜곡을 발생한다. 외부 요인에 의해 전송선로 사이에서 고속신호의 상태변환 시간(상/하향 변환시간)

이 전송선로의 전파지연보다 작아져 전송선로 입출력단의 임피던스 변화에 따라 반사파가 발생하여 신호 왜곡(distortion)을 일으키는 현상을 전송선로효과(transmission effect)라 한다[1]. 전송선로효과를 줄여 안정된 신호전송을 위해서는 논리상태가 고속변환 시간을 갖는 스위칭신호(TTL, ECL등)에 RF 전송선로의 개념을 적용시켜야 하며, 구동소자의 출력 특성 및 직류구동 역량, 수신소자의 입력특성, 스위칭 신호의

* 에이트론(주) 부설연구소(wh7308@a-tele.com)

** 교신저자, 경남대학교 정보통신공학과(kimminsoo@kyungnam.ac.kr)

접수일자 : 2011. 11. 25

심사(수정)일자 : 2012. 03. 15

게재확정일자 : 2012. 04. 07

로직레벨의 종류, 회로기판의 종류, 전송선로의 치수, 전송선로의 특성임피던스와 종단(termination) 방법에 대하여 연구되어야 한다[2-4]. 본 논문에서는 저온 상태(-40°C)에서 고속 전송선로의 전송선로효과가 발생하는 현상을 고려하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 전송매체의 전파지연과 스위칭 신호의 상태변환 시간과의 관계 그리고 전송선로에서 신호반사 특성을 분석하였고, 전송선로효과에 의해 왜곡된 반사신호를 감소시키기 위한 단선 및 차동인터페이스 임피던스 정합법을 적용함으로써 냉각온도에서도 고속 전송선로의 신호를 보전시키는 방안을 제시하고자 한다.

II. 고속데이터 전송을 위한 임피던스 종단이론

고속 동작하는 논리구동소자 신호의 상/하향변환시간 특성은 주변 온도와 같은 외부요인에 의해 영향을 받는다. 구동소자의 부하 입력캐패시턴스가 커질수록 RC시정수가 커져 전파지연은 더 크게 발생하며, 외부 온도가 영하 이하로 내려가면 로직신호의 상/하향변환 시간이 줄어들어 전파지연 시간과의 관계에 의하여 전송선로효과가 발생한다. 따라서 고속로직 신호를 전달함에 있어 전송선로효과를 고려하여 전송선로의 분포정수회로로 모델링하고 특성을 분석하여 전송선로의 반사특성 및 낮은 전파지연을 나타내는 전송매체를 선택해야 한다[5-6]. 그러나 전송선로의 선택에 있어서 외부 영향에 따른 전송선로의 선택이 다양해지는 물리적 제한이 있으므로 가장 보편적인 방안으로 전송선로간의 임피던스 종단(termination)방법을 적용하여 고속 전송선로에서 임피던스 정합관계를 분석하고 반사파의 영향을 최소화시키는 방안을 고려해야 한다. 임피던스 종단방안으로 가장 많이 이용되는 방법으로 반사파에 의해 전송신호의 영향을 받는 조건이 단선(single-ended) 종단방식일 때는 다음과 같다.

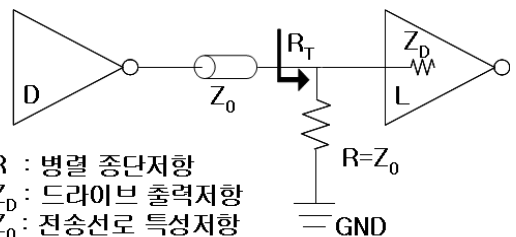
$$2 \times T_{PD} \times \text{전송선로의 길이} > T_R \quad (1)$$

차동(differential) 종단방식일 때는 다음 식으로 주어져 전송선로효과에 의한 신호왜곡의 발생유무를 판별할 수 있다[7-8].

$$4 \times T_{PD} \times \text{전송선로의 길이} > T_R \quad (2)$$

이때 T_{PD} 는 전파지연시간, T_R 은 펄스상승시간이며 T_f 는 펄스하강시간이다. 단선결연방식에서 전송선로와 구동단자 및 부하간의 임피던스 부정합으로 야기되는 전송선로효과는 구동단 또는 수신단에 직렬과 병렬로 부하를 인가하여 인위적으로 완화시킬 수 있으며 특히 병렬 연결방안이 특성이 우수하다[9].

단선(single-ended) 병렬종단방안은 수신단과 전송선로의 특성임피던스 부정합으로 반사파가 발생한다. 따라서 그림 1과 같이 부하 측에 병렬 종단저항을 사용하여 출력단에 임피던스 정합을 하였다. 일반적으로 부하단의 입력임피던스는 TTL로직회로를 사용할 경우 수 십[kΩ]에서 수[MΩ]을 갖게 되는데, 전송선로의 특성저항과 동일한 저항을 병렬 연결함으로써, 수신단에서의 임피던스 부정합을 개선할 수 있다.



- R : 병렬 종단저항
- Z_D : 드라이브 출력저항
- Z₀ : 전송선로 특성저항
- R_T : 부하쪽을 바라본 총저항

그림 1. 단선(Single-ended) 병렬 종단 구성도
Fig. 1 The block diagram of single-ended shunt termination

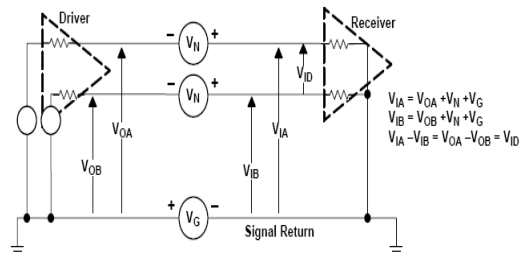


그림 2. 차동(Differential) 병렬 종단 구성도
Fig. 2 The block diagram of differential shunt termination

차동 임피던스 종단 방안은 잡음의 영향이 적고 먼 거리의 데이터 통신이 가능한 구조로써 두 신호간의 전압차를 이용하여 공통모드 잡음(common mode

noise)을 제거한다. 전송선로효과로 인한 반사파를 제거하기 위하여, 차동(differential) 인터페이스 방식의 종단방법은 병렬방식을 주로 사용한다[10-11]. 차동(differential) 병렬종단방법은 수신측에 병렬로 저항을 연결한 구조로서 저항의 값은 가능한 한 케이블의 특성임피던스에 준하며 높은 데이터 전송률과 먼 거리 통신을 지원하나 저항의 전력손실로 인하여 드라이브 측에 전력소비가 발생한다. 단선종결 결연방식은 차동(differential)인터페이스 방식보다 통신속도가 낮고 잡음에 의해 통신거리가 짧은 단점이 있으나, 신호전송에 하나의 전송선로만 필요하기 때문에 비용 및 회로설계가 간단하다는 장점이 있다[10].

III. 고속 정보시스템의 전송선로효과 실험 및 제거방안 분석

고속 정보전송시스템의 제어보드 사이에서 온도의 영향에 따라 고속 클럭 신호가 불안정하게 되면 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC에서 불안정한 샘플링에 의해 원치 않은 데이터를 출력하게 된다. 또한 신호처리기에서의 제어신호가 불안정하면 송수신 제어보드에서 불안정한 제어신호를 관련모듈로 보내게 되므로 송수신 기능을 떨어뜨린다. 이처럼 정보통신시스템의 각 모듈은 유기적으로 연결되어 있어 시스템 클럭과 제어신호의 불안정은 시스템의 오작동을 가중시킨다. 전송선로효과를 일으키는 불안정 외적요인은 고속모듈을 구성하는 소자의 특성변화이다. 특히 논리적인 연산 기능을 수행하는 능동소자는 저항, 인덕터, 커패시터와 같은 수동소자보다 주변온도에 매우 민감한 특성을 보인다. 능동소자의 특성은 기본적으로 I-V곡선에 의해 결정되는데, 온도가 증가하면 드레인 전류가 감소하며[11]. 능동소자의 전달컨덕턴스에 변화를 주게 되어 동작점 바이어스 포인트가 변하며, 능동소자의 입력과 출력 임피던스를 변화시켜 능동소자의 입/출력 임피던스 부정합을 야기한다. 능동소자는 일반적으로 저온에서 우수한 전기적 특성으로 인하여 전파지연시간이 감소하며 저온에서 빠른 동작속도를 기대할 수 있다[12]. 이와 같이 저온 동작에 의하여 능동소자 사이의 고속전송선로의 전파지연 문제로 인해 로직신호의 상태변화를 갖는 신호

가 전송매체를 통과할 경우 충분한 시간을 갖지 못하여 전송선로효과가 발생한다.

고주파 정보통신시스템의 전송선로효과를 분석하기 위하여 그림 3과 같이 주파수합성기(FSU: frequency synthesizer unit)와 송수신제어보드(TRC: transmitter receiver controller)를 선정하였다. 주파수합성기에서 크리스탈 발진기부터 60MHz 신호가 발생되며, 플립플롭에서 1/2로 분주하여 30MHz를 출력하며 다시 인버터를 통해서 30[cm]의 전송선로인 동축케이블을 통하여 송수신제어보드로 신호가 전송된다. 송수신제어보드에서는 30[MHz]의 신호는 다시 인버터를 통하여 플립플롭에서 1/2분주되고 15[MHz]신호로 출력된다. 각각의 보드의 기판은 $\epsilon_r = 4.8$ 인 FR-4 기판이며 소자 사이는 단선 마이크로스트립으로 설계하였다. 전송효과를 분석하기 위해서 플립플롭[74ACT74]과 인버터[74AC04]사이의 전송선로의 전파지연을 확인하였다. 그 결과 마이크로스트립의 전파지연(T_{pd})은 1.73[ns/ft]이고 플립플롭[74ACT74]과 인버터[74AC04]간 거리를 약 5[cm] (0.16[ft])로 하면 지연시간은 0.27[ns]이며, 왕복시간을 고려하면 총 전송선로의 왕복전파지연은 0.54[ns]가 된다.

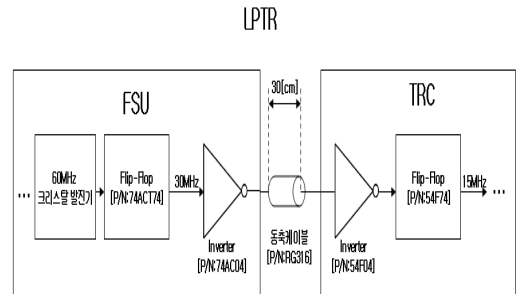


그림 3. 주파수합성기(FSU)와 송수신제어보드(TRC)간 연결도

Fig. 3 The connection between FSU and TPC

데이터시트를 참고하면 플립플롭[74ACT74]의 하향 시간(t_{PLH})과 상향시간(t_{PHL})은 전압 5[V] 출력을 기준으로 실내온도에서 각각 2[ns]와 2.5[ns]이므로 전송선로의 전파지연 $T_{pd}=0.54[ns]$ 와 비교하면 비교적 큰 값을 나타므로 식(1)로부터 전송효과가 발생하지 않는다. 그러나 주파수합성기모듈(FSU)과 송수신 제어보드(TRC)사이에 30[cm]의 동축케이블($\epsilon_r = 2.1$

6, RG-316기판)을 사용하면 전과지연은 1.49[ns/ft]이고, 길이 30[cm] (0.984[ft])와 왕복시간을 고려하면 동축케이블 사이의 왕복전과지연은 $T_{pd}=2.93[ns]$ 이 된다. 데이터시트를 참조하면, 인버터[74AC04]의 상향변환시간(tPLH)과 하향변환시간(tPHL)은 전압 5[V] 출력시 -40°C 온도에서 1[ns], 최고온도(+85°C)에서 7[ns]이므로 상온(25°C)에서 3.5[ns]의 상향변환시간(tPHL)을 고려할 때, 상온보다는 저온에서 전과지연시간이 신호변환시간보다 작기 때문에 전송선로효과 발생이 일어남을 예상할 수 있다. 따라서 저온에서 전송선로효과로 인한 클럭 신호의 왜곡 발생이 예상되므로 전송선로효과에 의한 왜곡신호를 감소시키기 위하여 전송선로에 대한 임피던스정합 종단방법이 필요하다.

그림 4는 주파수합성기(FSU)와 송수신제어보드(TRC)간 시스템 클럭에 대해 저온에서 전송선로효과로 인한 왜곡현상을 보여 주고 있다. 전송선로와 송수신 제어보드(TRC)간 임피던스 부정합을 감소시키기 위하여 그림 5에서와 같이 병렬종단 저항회로를 구성하였다. 저항 값을 25[Ω]에서 500[Ω]까지 가변시켜 ADS로 시뮬레이션 한 결과를 그림 6과 같이 병렬종단저항에 따른 구동소자의 값으로 나타내었다.

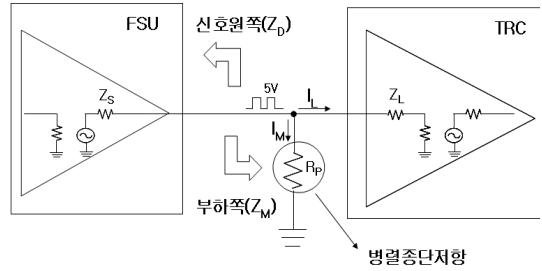


그림 5. 단선병렬종단저항을 추가 시 간략화된 모델
Fig. 5 The simplified model of single-ended termination adding shunt resistor

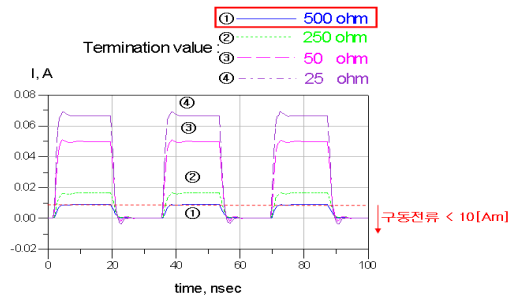


그림 6. 구동소자의 요구직류구동 용량 vs 단선종단병렬저항

Fig. 6 The single-ended shunt resistor vs. requirement DC driver cavity of driver device

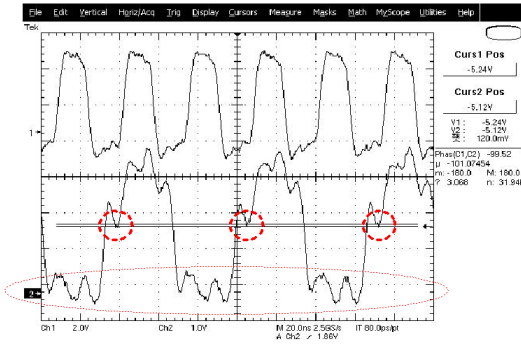


그림 4. 주파수합성기와 송수신모듈사이의 시스템 클럭 측정결과

Fig. 4 The measurement result of system clock between FSU and TRC

구동소자의 출력전류의 마진을 고려하여 10[mA]로 설정하면, 필요 종단저항의 값은 그림 6에서처럼 500 [Ω]된다. 실제 일반규격 저항 510[Ω]을 선택하여 적용한 결과는 그림 7과 같으며 신호의 왜곡은 50[Ω]에 비해 개선효과가 있음을 알 수 있다.

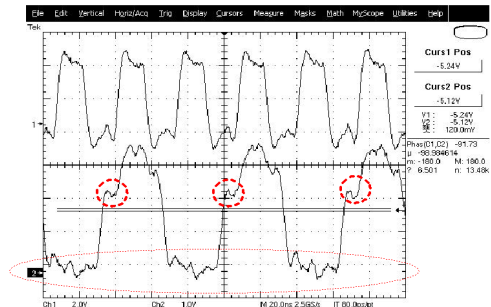


그림 7. 510[Ω] 단선병렬종단방법을 적용 후 시스템 클럭 측정결과

Fig. 7 The measurement result of system clock applied single-ended shunt termination

전송선로효과를 감소시키기 위한 차동 종단 연결 방식은 그림 8과 같이 송수신보드(TIB)와 송수신제어보드(TRC)사이에서 5.4[m](17[ft])의 통신거리로 차동(differential) 연결시켜 저온에서의 전송선로효과에 대하여 고려하였다.

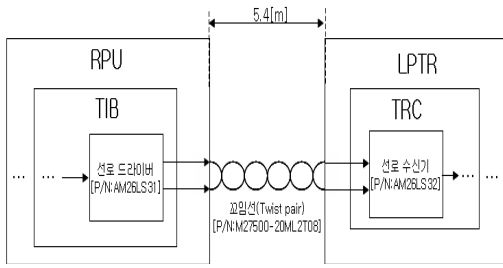


그림 8. 송수신인터페이스보드(TIB)와 송수신제어보드(TRC)간 연결도
Fig. 8 The connection of TIB and TRC

전송선로효과를 확인하기 위해서 전송선로의 전파 지연은 송수신인터페이스보드(TIB)와 송수신제어보드(TRC)간 통신을 위해 AWG-20 2선 전송선로(유전율 $\epsilon_r=12$ 갖는 수지(PTFE))를 사용하였다. 단위 길이당 전파지연 $T_{pd}= 3.5[\text{ns}/\text{ft}]$ 이며, 전송선로효과의 기준 값은 총 전송선로의 전파지연에 4배한 값인 $238 [\text{ns}]$ 였다. 그림 9는 구동소자인 차동선로드라이버(AM 26LS31)의 AC 스위칭특성을 보여준다. 상/하향변환 최대시간 $20[\text{ns}]$ (@ 25°C)을 적용하더라도, 전송선로의 총 전파지연은 $238[\text{ns}]$ 보다 작은 값을 나타내므로 상온에서도 충분히 전송선로효과가 발생함을 확인 할 수 있으며 특성임피던스는 식(2.57)로부터 $64[\Omega]$ ($s:2.5[\text{mm}]$, $d:0.8[\text{mm}]$, $\epsilon_r=12$)에 길이 $5.24[\text{m}]$ 를 적용결과 그림 9와 같이 전송선로효과로 인한 신호의 왜곡을 확인할 수 있었다.

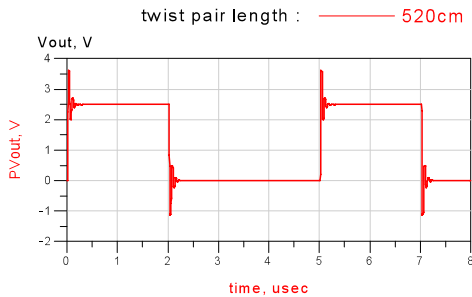
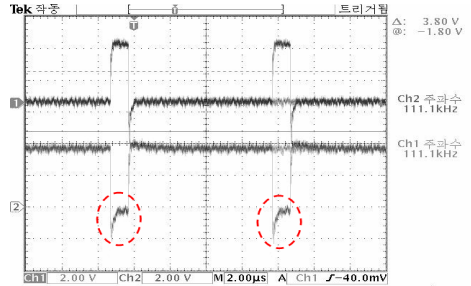


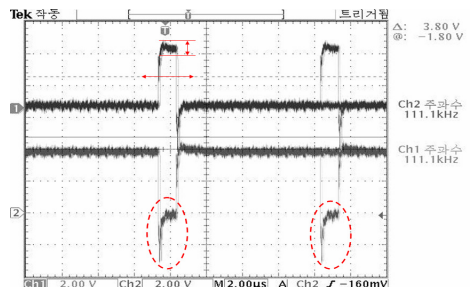
그림 9. 차동인터페이스 전송선로효과 시뮬레이션 결과
Fig. 9 The simulation result of differential transmitter effect

그림 10(a)는 실제 상온에서 제어신호의 왜곡이 발

생하고 있음을 보여주고 있으며 그림 10(b)와 같이 저온에서는 제어신호의 왜곡이 커짐을 확인하였다. 송수신인터페이스보드(TIB)와 송수신제어보드(TRC) 사이에서 발생한 제어신호의 왜곡을 개선하기 위하여 차동 병렬종단 저항 값 선택하여 ADS로 시뮬레이션 한 결과는 그림 11과 같다.



(a) 상온에서 제어신호측정결과



(b) 저온에서 제어신호측정결과

그림 10. $120[\Omega]$ 차동병렬종단방법을 적용 전 제어신호측정결과

Fig. 10 The result of control signal before 120ohm differential shunt termination

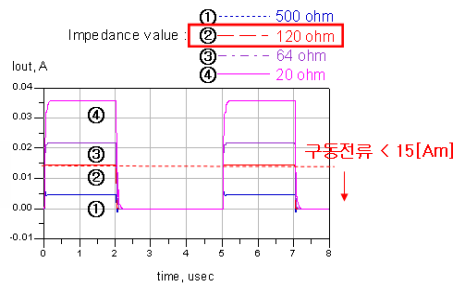


그림 11. 구동소자의 요구직류구동 용량 vs 차동병렬종단저항

Fig. 11 The differential shunt resistor vs. requirement DC driver cavity of driver device

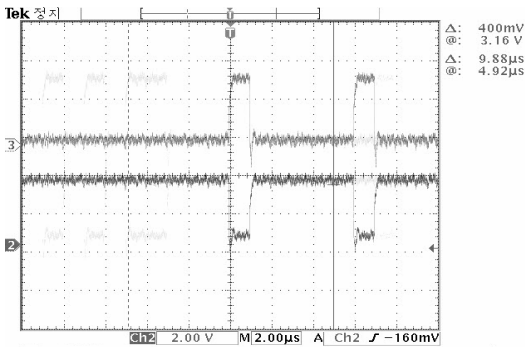
입력소자의 잡음마진을 고려하여 낮은 저항의 값을 선택 시 전압레벨은 내려가게 되어 잡음마진이 줄어들게 되어 구동소자의 출력전류구동용량, 입력전압의 잡음 마진 및 제어신호의 왜곡을 개선을 할 수 있다. 구동소자는 차동선로드라이버(AM26LS31)로 최대출력 전류는 20[mA](@High level output current)이므로 소자의 열화를 가져오지 않은 한계에서 구동전류를 15[Am]이하가 되는 120[Ω]이하의 값을 선택하였다.

V. 결론

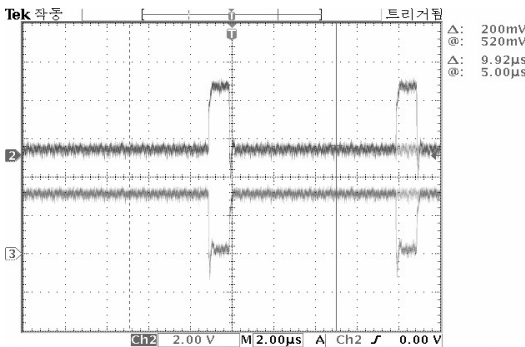
고속 정보시스템에서의 시스템 클럭신호와 제어신호는 디지털신호인 로직신호로 이루어져 있으며, 정보 시스템에 대한 상온과 저온 등의 외부환경 변화는 로직신호의 상/하향 변환시간에 영향을 미친다. 로직신호의 상태변화시간이 전송매체를 통과하는 동안 충분한 시간을 갖지 못한다면, 전송되는 신호는 전송선로 효과로 인하여 입출력의 부정합에 의해 발생하는 반사파의 영향을 받아 전송선로의 효과가 나타내어 시스템 전체에 큰 영향을 미치며 로직신호의 상태변화시간이 저온으로 갈수록 짧아져 이로 인한 전송선로 효과로 신호왜곡의 가능성을 높하게 되므로 고속통신에서는 전송선로효과를 고려한 중단방법을 통하여 반사파의 영향을 최소화해야 한다.

본 논문에서는 고속 신호처리시스템에서 사용되는 주파수합성기와 송수신제어보드사이에서 시스템 클럭신호, 송수신인터페이스보드와 송수신제어보드사이의 고속 제어신호의 왜곡에 대해서 정량적 수치계산과 ADS를 이용한 시뮬레이션을 통하여 전송매체의 전파 지연에 따른 전송선로효과와 왜곡신호의 최소화를 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 단선인터페이스통신을 적용하는 주파수합성기와 송수신제어보드사이에서 구동소자인 인버터[74AC04] 출력전류의 마진을 10[mA]로 설정하여 단선병렬중단의 값을 510[Ω]으로 선택하였으며, 차동인터페이스통신방식을 적용하는 수신인터페이스보드와 송수신제어보드사이의 구동소자인 차동드라이버[AM26LS31]의 출력전류마진을 15[mA]로 고려하여 병렬중단 저항값을 120[Ω]로 선택하였다. 이를 적용하여 시스템 클럭 및 제어신호 왜곡의 개선을 실험을 통하여 확인하였으며, 저온환경에서 체계에 적용결과 초기운용에서의 노이즈표적발생을 확인할 수 없었다.

향후 고속의 데이터통신을 위해 회로를 설계하고 개발함에 있어서 높은 사양의 소자를 선택하는 것도 중요하지만, 전송선로효과를 고려한 전송매체의 설계가 사전에 고려된다면 안정된 신호의 전송을 통하여 신호의 불안정에 의한 시스템의 이상 현상을 억제시킬 수 있다. 디지털 레이더와 같은 특수 목적의 고속 정보시스템의 개발할 때 본 논문에서 제시한 전송선로효과에 의한 왜곡 극소방안을 고려한다면 저온 환경에서도 고속으로 초기 가동능력을 나타낼 수 있다.



(a) 상온에서 제어신호측정결과



(b) 저온에서 제어신호측정결과

그림 12. 120[Ω] 차동병렬중단방법을 적용 후 제어신호측정결과

Fig. 12 The result of control signal after 120ohm differential shunt termination

그림 12와 같이 120[Ω]의 중단병렬저항을 적용한 신호파형을 보여주고 있다. 차동병렬중단저항을 적용하기 전보다 제어신호의 왜곡이 감소됨을 확인 할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

- [1] 이상철, "강정수, 레이더 공학", 보성문화사, 1999.
- [2] Merrill I. Skolnik, Introduction to RADAR systems, McGraw-Hill, 2001.
- [3] Howard Johnson, High-Speed Digital Design, Prentice Hall, 2004.
- [4] Granzow, Kenneth D, Digital Transmission Lines, Oxford, 1998.
- [5] 박종철, 이강훈, 이영철, "고전력 RF-Filter의 수동혼변조 저감방안에 대한 연구", 한국전자통신학회논문지, 3권, 4호, pp.621-627, 2011.
- [6] 홍완표, "데이터 전송 효율을 고려한 3x4 비트 1 바이트 문자 부호화 규칙에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 6권, 4호, pp.282-288, 2008.
- [7] Ron Schmitt, Analyze transmission lines with (almost) no math, design feature, pp 143-150, March 1999.
- [8] A del S. Sedra, Kenneth C. Smith, Micro-electronic Circuits 4th, OXFORD, 1998.
- [9] "아날로그 신호의 아이솔레이션법이란", EST월간전자기술, pp. 118-120, 1999년 6월.
- [10] Proper Signal Termination of 422 Data transmission Signals, Manual TN-Proper_422_Signal_Termination Rev A : MicroE Systems.
- [11] 422 and 485 Standards Overview and System Configurations, Application Report SLLA070C, TEXAS INSTRUMENTS, June 2002.
- [12] F.Aniel, P.Crozat, A.De Lustrace, R. Adde, Y.Jin, "High electric field transport effects on low temperature operation of pseudomorphic HEMTs", JOURNAL DE PHYSIQUE IV, Vol. 4, pp. C716-C176, 1994.

저자 소개

장연길(Yeon-Gil Jang)



2010년 경남대학교 정보통신공학과 졸업 (공학사)

2011년~현재 경남대학교 대학원 정보통신공학과 석사과정

2000년~현재 에이트론(주) 부장

※ 관심분야 : 능동소자 설계 및 응용, 레이더

이영철(Young-Chul rhee)



1981년~현재 경남대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 능동소자 설계 및 응용, 반도체 레이더 시스템