

論文2003-40TC-12-16

W-CDMA 기지국용 디지털 수신기의 CIC 를 오프 보상필터 설계

(Design of Cic roll-off Compensation Filter in Digital Receiver For W-CDMA NODE-B)

金 聖 道 * , 崔 勝 元 **

(Seongdo Kim and Seungwon Choi)

요 약

ADC (Analog-to-Digital Converter) 와 DSP (Digital Signal Processor) 의 성능이 향상됨에 따라 아날로그 방식으로 처리하던 IF(Intermediate Frequency) 대역의 신호를 디지털 방식으로 처리할 수 있게 되었다. 으며, 이를 디지털 라디오 또는 디지털 IF라 하고 이는 SDR (software defined radio) 의 초기단계라 할수있다. 디지털 라디오 개념을 수신단에 적용할 경우 오버샘플링에 의한 처리 이득을 얻을 수 있으며, 각종 캐리어방식의 수신단 설계가 가능하다. 디지털 수신기에서는 연산량 이득을 위해 데시메이션이 이루어지며, CIC (Cascaded Integrated Comb) 및 halfbandHalfband 필터 등이 엘리어싱방지 필터로 사용된다. 그런데, CIC 필터는 필연적으로 통과대역 내에서 롤 오프 현상이 발생하며, 이것은 수신단 필터의 통과대역 평탄도를 악화시켜서 수신성능의 저하를 초래한다. FIR 필터를 이용하여 보상해 주어야 한다. 본 논문에서는 W-CDMA 디지털 수신기의 수신성능에 최적인 CIC 롤오프 보상 필터를 설계방법을 제시하고, 설계된 필터가 CIC필터의 롤오프 특성을 보상하여 BER(Bit Error Rate)을 최소화시킴을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 필터 성능을 검증하였다.

Abstract

Owing to the advances in ADC and DSP technologies, signals in IF band, which once had to be processed in analog technology, can now be digitally processed. This is referred to as "Digital IF" or "Digital Radio", which is a preliminary stage of SDR. Applying the digital radio technology to a multi-carrier receiver design, a processing gain is generated through an over-sampling of input data. In the digital receiver, decimation is performed for reducing the computational complexity. CIC and half band filter is used together with the decimation as an anti-aliasing filter. The CIC filter, however, should introduce the roll-off phenomenon in the passband, which causes the receiving performance to be considerably degraded due to the distorted passband flatness of receiving filter. In this paper, we designed a CIC roll-off compensation filter for W-CDMA digital receiver. The performance of the proposed compensation filter is confirmed through computer simulations in such a way that the BER is minimized by compensating the roll-off characteristics.

Keywords : W-CDMA, CIC filter, Roll-off, Pulse Shaping Filter, ADC

* 正會員, 에이스테크놀로지 신규사업팀

(Advanced R&D Team, Ace Technology)

** 正會員, 漢陽大學校 電子通信電波工學科

(School of Electrical and Computer Engineering,

Hanyang University)

※ 본 연구는 정보통신연구진흥원의 ITRC 과제를 수행

하는 HY-SDR 연구센터의 지원으로 수행되었음.

接受日字:2003年8月14日, 수정완료일:2003年11月20日

I. 서 론

고속의 ADC, DAC 및 DSP 칩이 등장함에 따라 DSP를 이용하여 IF 대역의 신호를 처리할 수 있게 되었으며, 이를 “디지털 라디오” 또는 “디지털 IF”라 한다^[1-2]. 디지털 라디오를 적용할 경우 아날로그 소자를 DSP 칩으로 대체함으로써, 온도의 변화 및 에이징 등에 영향을 받지 않게 되어 보다 안정적인 시스템을 설계할 수 있다^[1-3]. 또한 소프트웨어의 설정을 통해 WCDMA 및 CDMA-2000 등 다양한 규격을 지원할 수 있다. 그리고 다중캐리어 방식의 송수신단 설계가 가능하여 비용을 절감할 수 있다^[3-4]. <그림 1>은 단일 캐리어 방식의 아날로그 수신단과 다중 캐리어 방식의 디지털 라디오 수신단을 비교한 것이다.

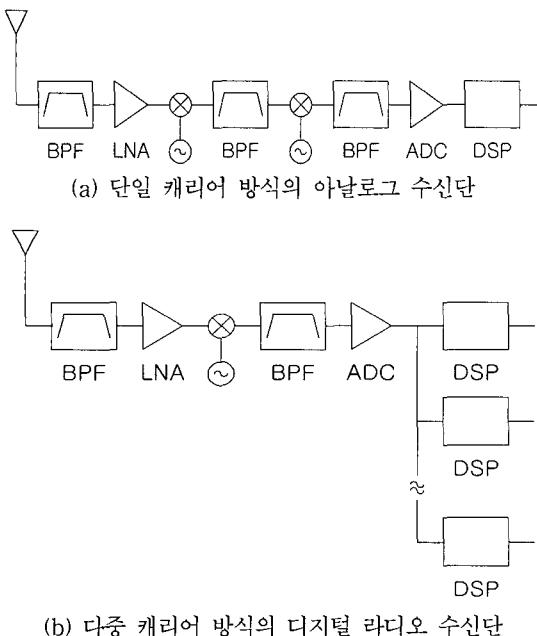


그림 1. 아날로그 수신단과 디지털 라디오 수신단^[1-4].
Fig. 1. Comparison of analog receiving part and digital receiving part.

디지털 라디오 수신단에서는 다중 FA(Frequency Assignment)를 처리하고, 처리이득을 얻기 위해 오버샘플링을 수행한다^[5]. 각 FA에 대한 채널선택은 디지털 수신기의 FIR 필터에 의해 이루어진다. FIR 필터의 연산량은 데이터 레이트에 지수적으로 비례하므로, 오버샘플링 된 신호에 대해 데시메이션이 이루어져야 한다^[6].

③ 이 때 앤리어싱을 방지하기 위한 앤리어싱방지 필터로 CIC 또는 Halfband 필터를 사용하며, CIC 필터의 경우 통과대역에서 롤 오프 현상이 발생하므로 이를 보상해주어야 한다.

2. CIC Filter

CIC 필터는 연산이 덧셈만으로 이루어진 관계로 데이터 레이트가 높은 곳에서 앤리어싱방지 필터로 사용된다. CIC 필터의 전달 함수는 아래와 같다:

$$H(z) = \left(\frac{1 - z^{-R}}{1 - z^{-1}} \right)^N$$

여기서 R 과 N 은 각각 데시메이션 레이트와 CIC 필터의 차수를 의미한다^[7-10]. <그림 2>는 $R=10$ 이고 $N=5$ 인 경우 주파수 응답특성을 나타낸 것이다.

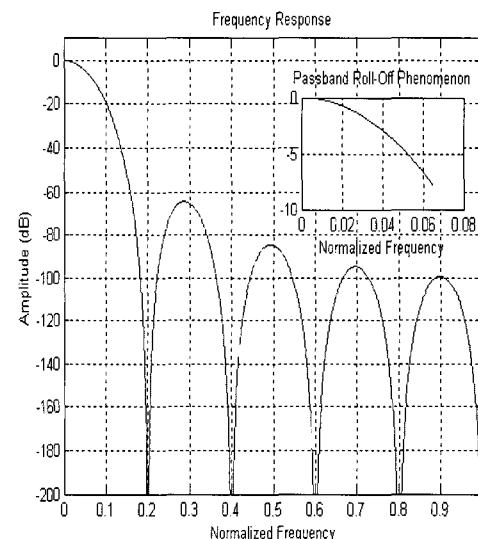


그림 2. $R=10$ 이고 $N=5$ 인 경우 CIC 필터의 주파수 응답특성

Fig. 2. Frequency response of CIC filter.

<그림 2>에서 보듯이 통과대역에서 롤오프 현상이 발생함을 알 수 있으며, 이는 신호의 왜곡에 따른 성능 저하를 가져온다^[7-11].

CIC 필터의 출력 데이터 레이트는 일반적으로 halfband 필터 등의 데시메이션 필터의 사용여부에 따라 칩레이트 기준으로 2x 또는 4x이다. WCDMA의 칩레이트는 3.84 Mcps이며, 출력레이트 레이트는 7.68 MCPS 또는 15.36 Mcps이다. <표 1>은 데시메이션 레이트에 따른 CIC 필터의 주파수 응답 특성을 나타낸 것이다.

표 1. 데시메이션 레이트에 따른 롤 오프 및 SNR
Table 1. Roll-off and SNR variation as decimation rate increase.

Decimation Rate	Output Data Rate = 2x		Output Data Rate = 4x	
	Roll Off (dB)	SNR (dB)	Roll Off (dB)	SNR (dB)
2	-5.19	-13.31	-1.26	-24.24
5	-6.60	11.65	-1.61	-22.22
8	-6.76	-11.48	-1.65	-22.02
11	-6.81	-11.44	-1.66	-21.96
14	-6.83	-11.42	-1.67	-21.94
17	6.84	-11.41	-1.67	-21.93
20	-6.85	-11.40	-1.67	-21.92

표 2. Eb/N0 악화에 따른 잡음 증가
Table 2. Noise increasing as Eb/N0 degrade.

Eb/N0 Degradation (dB)	Noise Increase (dB)	
	Eb/N0REQ = 2 (dB)	Eb/N0REQ = 7 (dB)
0.01	-28.38	-33.38
0.05	-21.37	-26.37
0.1	-18.33	-23.33
0.3	-15.46	-18.46
0.5	-11.14	-16.14
0.7	-9.57	-14.57
1.0	-7.87	-12.87
1.5	-5.85	-10.85
2.0	-4.33	-9.33

이트에 따른 통과대역 에지에서의 롤 오프 및 SNR을 정리한 것이다. 이 때 CIC 필터의 차수는 5차이고, 통과대역 에지는 2.3424 MHz이다.

잡음지수를 0dB라고 가정할 경우, BER=0.1%를 유지하기 위해 WCDMA의 복조기에서 원하는 Eb/N0는 7 dB이다. 만약 잡음지수가 5dB이면, 원하는 Eb/N0는 2dB로 완화된다. <표 2>는 요구되어지는 Eb/N0를 기준으로 Eb/N0가 악화됨에 따라 추가적으로 발생한 잡음을 정리한 것이다.

예를 들어 데시메이션 레이트가 11이고, 출력 데이터 레이트가 2배인 경우, 요구되어지는 Eb/N0가 2 dB이면 대략 0.5 dB의 성능저하를 가져온다. 만약 요구되어지는 Eb/N0가 7 dB이면 약 1 dB의 성능저하를 가져온다. 따라서 DSP의 연산능력이 한정되어 있을 경우, 보상필터

의 사용여부는 채널선택 필터와의 트레이드 오프를 통해 결정한다.

3. CIC 롤오프 보상 필터

CIC 롤오프 보상필터는 연산량 이득을 위해 채널선택 필터와 콘볼루션시킨다. 일반적으로 채널선택 필터가 대칭특성을 가지므로, CIC 롤오프 보상 필터 역시 대칭특성을 가져야 하며, 이와 같은 특성을 가지는 최소 차수는 3차이다. 가운데 계수의 값을 1로 정규화하고, 이득을 1로 하면 보상필터 $c(n)$ 은 아래와 같다.

$$c(n) = \left\{ \frac{-a}{1-2a}, \frac{1}{1-2a}, \frac{-a}{1-2a} \right\}, \text{ 단 } a \neq 0.5$$

보상필터 $c(n)$ 의 주파수 응답특성 $C(\omega)$ 는 아래와 같이 표현된다:

$$C(\omega) = \frac{1 - 2a \cos \omega}{1 - 2a}, \text{ 단 } a \neq 0.5$$

CIC 필터의 응답특성을 $F(\omega)$ 라 하고, 이상적인 응답특성을 $D(\omega)$ 라 하면, 오류함수 $E_{UW}(a)$ 는 아래와 같이 정의된다:

$$E_{UW}(a) = \int_0^{p.e.} (D(\omega) - C(\omega)F(\omega))^2 d\omega$$

여기서 $p.e.$ 는 수신신호의 통과대역 edge를 의미한다. 일반적으로 수신신호는 천이영역으로 인해 정확한 통과대역에지를 정의하기 어렵다. 이 때 수신신호의 주파수 응답특성을 무게함수로 사용하면 보다 정확하게 롤오프 현상을 보상할 수 있다. $E(a)$ 는 무게함수 $W(\omega)$ 를 사용할 경우 오류함수이다.

$$E(a) = \int_0^{\pi} (D(\omega) - C(\omega)F(\omega))^2 W(\omega) d\omega$$

$D(\omega) = 1$ 이라 하면, $E(a)$ 는 아래와 같다:

$$\begin{aligned} E(a) &= \int_0^{\pi} \left(1 - \left(\frac{1 - 2a \cos \omega}{1 - 2a} \right) F(\omega) \right)^2 W(\omega) d\omega \\ &= \frac{1}{(1 - 2a)^2} \left(4a^2 \int_0^{\pi} (\cos \omega F(\omega) - 1)^2 W(\omega) d\omega \right. \\ &\quad + 4a \int_0^{\pi} (\cos \omega F(\omega) - 1)(1 - F(\omega)) W(\omega) d\omega \\ &\quad \left. + \int_0^{\pi} (1 - F(\omega))^2 W(\omega) d\omega \right) \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{(1-2a)^2} \left(\alpha a^2 + \beta a + \frac{r}{4} \right)$$

여기서 α, β 그리고 r 은 각각 아래와 같다.

$$\alpha = 4 \int_0^\pi (\cos \omega F(\omega) - 1)^2 W(\omega) d\omega$$

$$\beta = 4 \int_0^\pi (\cos \omega F(\omega) - 1)(1 - F(\omega)) W(\omega) d\omega$$

$$r = 4 \int_0^\pi (1 - F(\omega))^2 W(\omega) d\omega$$

그리고 $E(a)$ 의 1차 미분함수를 $E'(a)$ 라 하면 아래와 같이 표현된다:

$$\begin{aligned} E'(a) &= \frac{(2\alpha a + \beta)(4a^2 - 4a + 1) - (\alpha a^2 + \beta a + \gamma/4)(8a - 4)}{(1-2a)^4} \\ &= \frac{-4(\alpha + \beta)a^2 + 2(\alpha - \gamma)a + (\beta + \gamma)}{(1-2a)^4} \\ &= \frac{-1}{(1-2a)^4} \times 4(\alpha + \beta)(a - \frac{1}{2})(a + \frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta}) \end{aligned}$$

보조정리 1. $-\frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta} < \frac{1}{2}$ 이다.

(증명) $f(a) = -4(\alpha + \beta)(a - \frac{1}{2})(a + \frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta})$ 라 하자. $\alpha + \beta$ 는 아래의 조건을 만족하므로

$$\alpha + \beta = 4 \int_0^{p.e} F(\omega)(1 - \cos \omega F(\omega))(1 - \cos \omega) d\omega > 0$$

이차항의 계수는 언제나 음수이다. $f(a)$ 의 미분함수 $f'(a) = -8(\alpha + \beta)a + 2(\alpha - \gamma)$ 는 $a = 1/2$ 에서 언제나 음수이다:

$$\begin{aligned} f'(1/2) &= -(2\alpha + 4\beta + 2\gamma) \\ &= -2 \int_0^{p.e} (F(\omega)(1 - \cos \omega))^2 d\omega < 0 \end{aligned}$$

따라서 $-\frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta} < \frac{1}{2}$ 이다.

정리 1. 는

$$a = \frac{\int_0^\pi F(\omega)(1 - \cos \omega F(\omega))(1 - F(\omega)) W(\omega) d\omega}{\int_0^\pi F(\omega)(1 - \cos \omega F(\omega))(1 - \cos \omega) W(\omega) d\omega} \text{ 일 때}$$

최소값을 갖는다.

(증명) 구간 $[-\infty, 1/2]$ 에서는 $a = -\frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta}$ 일 때 오류가 최소이다. 구간 $(1/2, \infty]$ 에서는 $a = \infty$ 일 때 오류값이 최소이다. $E(-\infty) = E(\infty)$ 이므로, $a = -\frac{\beta + \gamma}{\alpha + \beta}$ 일 때 오류가 최소이다.

W-CDMA에서는 펄스성형필터로 $\alpha = 0.22$ 인 루트제곱코사인 필터를 사용한다. 수신단에서 정합필터를 사용하면 W-CDMA의 무게함수 $W(\omega)$ 는 아래와 같이 정의 할 수 있다:

$$W(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega < \frac{\pi}{2}(1-0.22) \\ \cos^4 \left[\frac{1}{2 \times 0.22} \left(\omega - \frac{\pi}{2}(1-0.22) \right) \right], & \frac{\pi}{2}(1-0.22) < \omega < \frac{\pi}{2}(1+0.22) \\ 0, & \frac{\pi}{2}(1+0.22) < \omega < \pi \end{cases} \quad (1)$$

표 3. 최적의 필터계수와 보상필터 사용에 따른 SNR

Table 3. SNR variation using filter coefficient and data rate.

Decimation Rate	Output Data Rate 2x		Output Data Rate 4x	
	a	SNR (dB)	a	SNR (dB)
2	0.1458	-37.56	0.0425	-53.49
5	0.1757	-34.73	0.0536	-51.00
8	0.1789	-34.44	0.0548	-50.76
11	0.1799	-34.35	0.0552	-50.69
14	0.1803	-34.31	0.0553	-50.65
17	0.1805	-34.29	0.0554	-50.64
20	0.1806	-34.28	0.0555	-50.63

<표 3>은 무게함수로 식 (1)을 사용하였을 때, 데시메이션에 따라 오류를 최소화하는 a 와 보상필터를 사용할 경우 SNR을 정리한 것이다.

<그림 3>은 CIC 필터, 보상필터 그리고 보상필터를 사용하였을 때의 주파수 응답특성을 도시한 것이다. 식 (1)의 무게함수를 사용하였으므로 1.4976 MHz 이하의 주파수 대역에 대한 보상에 초점을 맞춘 것을 알 수 있다.

4. 시뮬레이션

<그림 4>는 데시메이션 레이트가 11이고, 출력 데이

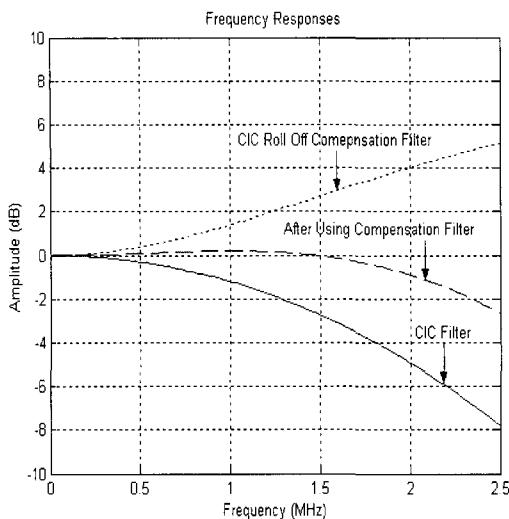


그림 3. 보상필터 사용유무에 따른 주파수 응답특성
(decimation Rate=11, Output Data Rate=2x)

Fig. 3. Frequency response with/without compensation filter.

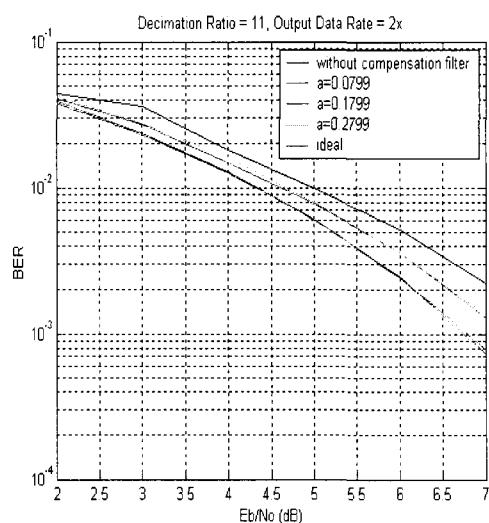


그림 4. 보상필터에 따른 BER 특성

Fig. 4. BER characteristic as filter coefficient varies.

터 레이트가 2x인 경우 CIC 룰오프 보상필터의 사용여부에 따른 BER(Bit Error Rate)특성을 그림으로 나타낸 것이다. 보상필터를 사용함으로써 성능이 향상됨을 알 수 있으며, $\alpha = 0.1799$ 이면 이상적인 BER 특성과 유사하다.

V. 결 론

W-CDMA 수신단에 디지털 라디오 개념을 도입하면 시스템 안정성을 높일 수 있고, 다중 캐리어 방식을 도입할 수 있어 비용을 절약할 수 있다. 본 논문에서는 디지털 수신기의 앤리어싱방지 필터로 사용되는 CIC 필터의 룰 오프 특성으로 인한 성능저하를 줄이는 최적의 보상필터를 설계하는 방안을 제시하였다. 또한 데시메이션 레이트에 따라 보상필터의 사용여부를 결정하는 기준을 제시하였다. 본 논문에서 제안한 CIC 룰오프 보상필터의 실제 방법은 W-CDMA는 물론 CDMA-2000에도 적용할 수 있으며, 송신단의 인터폴레이터 및 DAC(Digital to Analog Converter)보상 필터설계에도 사용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Basics of Designing a Digital Radio Receiver, Brad Brannon, Analog Devices, Inc. Greensboro, NC.
- [2] Designing a Super Heterodyne Multi Channel Digital Receiver, Brad Brannon, Analog Devices, Inc. Greensboro, NC.
- [3] Undersampling Techniques Simplify Digital Radio, Richard Groshong and Stephen Rusnak, Electronic Design, May 23, 1991, pg. 67 ~ 78.
- [4] Using Wide Dynamic Range Converters for Wide Band Radios, Brad Brannon, RF Design, May 1995, pg. 50 ~ 65.
- [5] Optimize ADCs For Enhanced Signal Processing, Tom Gratzek and Frank Murden, Microwaves & RF reprint.
- [6] R.Prasad, H.I.Harada, Simulation and Software Radio for Mobile Communication, Aetech House, 2002
- [7] E.B. Hogenauer, "An Economical Class of Digital Filter for Decimation and Interpolation," IEEE trans. Of Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, April 1981.
- [8] C. Riley, D. Chester, A. Razavi, F. Taylor, and W. Ricker, "High-Decimation Digital Filters,"

- 1991.
- [9] L. Wasserman and Alan N. Willson, Jr., "A Variable-Rate Filtering System for Digital Communications," 1999.
- [10] K.-Y. Khoo, Z. Yu and A. N. Willson, Jr., "Efficient High-Speed CIC Decimation Filter," in Proc. 11th Annual IEEE International ASIC Conference, USA, pp. 251-254, 1998.
- [11] Sanjit K. Mitra, Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach, McGraw Hill, 1998.

저자 소개



金聖道(正會員)

1984년 3월~1988년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사). 1988년 3월~1990년 2월 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사). 1997년 2월 ~현재 : 한양대학교 전자통신전파 공학과 박사과정 수료. 1990년 3월~2000년 2월 : 국방과학연구소 선임연구원. 2000년 2월~2002년 6월 : 현대전자 3G시스템기술연구팀 책임연구원. 2002년 6월~현재 : 에이스 테크놀로지 신규사업팀 부장. <주관심분야>: 스마트안테나, SDR, CDMA, PA linearization>



崔勝元(正會員)

1976년 3월~1980년 2월 : 한양대학교 공과대학 전자공학과(공학사). 1980년 3월~1982년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과(공학석사). 1984년 9월~1985년 12월 : Syracuse University 전산공학(공학석사). 1986년 1월~1988년 12월 : Syracuse University 전산공학(공학박사). 1982년 11월~1984년 7월 : (주) 금성사 중앙연구소 연구원. 1988년 8월~1989년 5월 : Syracuse University 전기 및 전산과 조교수. 1989년 6월~1992년 8월 : ETRI 선임 연구원. 1990년 3월~1992년 2월 : 일본 우정성 통신연구소, 초빙 연구원. 2000년 1월~현재 : (주) 한텔, 연구소장. 1992년 9월~현재 : 한양대학교 전자전기공학부, 교수