

# 동일채널중계기의 송수신신호 주파수 일치

음호민 이용태 김홍묵 서재현 박성익 김승원

한국전자통신연구원

hmeum@etri.re.kr

## Frequency Synchronization Between Input and Output Signal for Digital On-Channel Repeater

Eum, Ho-Min Lee, Yong-Tae Kim, Heung-Mook

Seo, Jae-Hyun Park, Sung-Ik Kim, Seung-Won

Electronics and Telecommunications Research Institute

### 요약

지상파 디지털 방송신호의 방송구역 확장이나 난시청지역 해소를 위해 사용되는 동일채널중계기(On-Channel Repeater : OCR)는 수신신호와 송신신호의 주파수를 완벽히 일치시켜야 한다. 송수신신호의 주파수가 일치하지 않을 경우 주 송신신호와 중계신호가 동시에 수신되는 중첩지역에서 수신기의 수신성능이 현저히 저하되기 때문이다. 본 논문에서는 ATSC 지상파 디지털 방송신호를 중계하는 등화형 동일채널중계기(Equalization Digital On-Channel Repeater : EDOCR)에서 송수신신호의 주파수를 일치시키는 알고리즘에 대해 기술한다. 등화형 동일채널중계기는 주 송신신호를 수신하여 복조한 후 재 변조 하므로 송수신신호의 주파수를 일치시키기 위한 별도의 장치나 알고리즘이 반드시 사용되어야 한다. 제안하는 알고리즘은 주 송신신호의 동기복원 과정에서 획득한 주파수 오차 정보를 재 변조 과정에 사용함으로써 GPS와 같은 별도의 장치 없이 송수신신호의 주파수를 일치시킨다. 반송파 복원과정에서 획득한 반송파 오차와 심볼타이밍 복원과정에서 획득한 심볼타이밍 오차를 재 변조 신호에 추가하면 수신신호와 송신신호가 같은 주파수 오차를 갖게 되어 두 신호의 중심주파수가 일치된다.

### 1. 서론

주 송신소의 방송구역 내에는 지형적인 특성으로 적절한 전계강도가 확보되지 않는 다수의 난시청지역이 발생할 수 있다. 산악지형으로 인한 난시청지역은 주로 산 정상에 중계기를 설치하여 해소한다. 중계기의 중계범위는 대부분 난시청지역을 포함하지만 전파전파의 특성으로 일부는 주 송신소의 신호가 적절한 수준으로 수신되는 가시청지역과 중첩된다.

지상파 아날로그 방송의 난시청지역 해소에는 주 송신기의 송신채널과 다른 채널을 사용하여 중계신호를 전송하는 이채널중계기(Off-Channel Repeater)가 사용된다. 아날로그 방송의 경우 방송방식 자체의 한계로 인하여 중계신호와 주 송신신호의 채널이 같으면 중첩지역에서의 수신율이 현저히 떨어지기 때문이다. 중계기의 송신채널과 주 송신기의 송신채널을 달리하면 중첩지역의 수신율이 중계신호에 의해 저하되지 않는 반면 별도의 채널이 추가로 할당되어야 하는 단점이 있다. 지상파 디지털 방송의 경우에도 중계소에 별도의 채널을 할당하여 사용하고 있는데 이는 방송방식 자체의 기술적 한계라기보다 현재까지의 중계기술의 한계와 기술외적인 요인에 기인한다. 동일채널중계기술이 지상파 디지털방송과 적절히 접목될 수만 있다면 제한된 주파수자원의 절약과 더불어 절약된 주파수의 효율적인 이용을 꾀할 수 있을 것이다.

동일채널중계기는 주 송신신호를 수신하여 주 송신신호와 같은 RF 중심주파수를 갖는 신호를 전송한다. 동일채널중계기술이 지상파

디지털 방송에 적용되기 위해서는 난시청지역을 해소하면서 동시에 중첩지역의 수신율을 저하시키지 않아야 한다. 이를 위해서는 중계기 시스템지연의 최소화, 고품질 및 고출력의 출력신호 전송, 중계기 송수신신호의 주파수 일치를 위한 기술이 확보되어야 한다. 이러한 기술은 이미 ATSC 지상파 디지털 방송신호를 중계하는 등화형 동일채널중계기에 적용되어 필드테스트를 통해 그 효용성이 검토된 바 있다.[1][2]

본 논문에서는 동일채널중계기의 요소기술 중 송수신신호의 주파수 일치에 관해 논한다. 중계신호와 주 송신신호간의 주파수 차이는 두 신호 중 한 신호에 대해 도플러 변이가 발생한 것과 같은 효과를 가져 수신기의 수신성능을 현저히 저하시키므로 두 신호의 주파수는 반드시 일치되어야 한다. 2장에서 본 논문에서 제안하는 기술이 적용될 등화형 동일채널중계기에 관해 간단히 언급하고 주파수 일치 알고리즘을 적용한다. 3장에서는 등가모델을 통해 송수신신호의 주파수 및 위상 오차를 분석하고, 4장에서 시뮬레이션 및 시스템 성능을 검증한 후 5장에서 결론을 맺는다.

### 2. 동일채널중계기의 개념과 주파수 일치기술 적용

#### 가. 동일채널중계기

동일채널중계기의 종류는 RF형, IF형 그리고 등화형으로 나눌 수 있다. RF형 동일채널중계기는 수신된 신호를 아날로그 필터로 필

터링하여 증폭한 후 전송한다. 이 경우 수신된 RF 신호의 중심주파수는 변함이 없으므로 별도의 주파수 일치 장치 없이도 송수신 신호의 주파수가 자연히 일치된다. IF형 동일채널중계기는 RF 수신신호를 IF로 변환한 후 아날로그 필터로 필터링하거나 샘플링한 후 디지털 필터링하여 증폭한 신호를 RF로 전송한다. 이 경우 시스템 내에 주파수 변환 과정이 있지만 중계기 내의 주파수 변환, 아날로그-디지털 변환(ADC), 디지털-아날로그 변환(DAC)에 동일한 참조주파수를 사용하면 수신신호와 동일한 주파수를 가지는 RF 신호를 전송할 수 있다.

등화형 동일채널중계기는 주 송신신호를 복조하여 등화기를 거쳐 재 변조 한 후 증폭하여 전송한다. RF형과 IF형 동일채널중계기보다 시스템의 시간지연이 수 us 정도 더 길지만 수신신호를 등화함으로써 제한신호 제거는 물론 채널왜곡을 보상하여 고품질의 고효율 중계신호를 전송할 수 있다. 등화형 동일채널중계기의 송수신부 구조는 그림 1과 같다.[1]

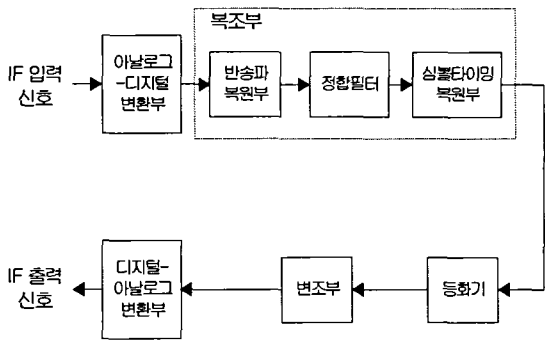


그림 1. 등화형 동일채널중계기의 송수신부 구조

등화형 동일채널중계기는 동기복원과정에서 수신신호의 주파수 오차와 위상 오차를 제거한다. 수신된 RF 신호는 주 송신기의 주파수 변환이나 디지털-아날로그 변환에 사용되는 발진기 고유의 오차 등으로 인해 이상적인 RF 주파수와는 다른 주파수를 가진다. 등화형 동일채널중계기에서 재 변조 된 신호에 이 주파수 오차가 반영되지 않을 경우 주 송신신호와 중계신호는 그만큼의 주파수 차이를 갖게 되어 수신기의 수신성능은 물론 제한신호로 인해 등화형 동일채널중계기 자체의 성능도 크게 저하된다. 따라서, 등화형 동일채널중계기에는 별도의 주파수 일치 알고리즘이 반드시 적용되어야 한다.

#### 나. 송수신신호 주파수 일치

등화형 동일채널중계기의 동기복원에는 반송파 복원과 심볼타이밍 복원이 있다. 반송파 복원은 수신신호의 반송파 오차를 제거하고 심볼타이밍 복원은 샘플링 타이밍 오차를 제거한다. 송수신신호의 주파수가 일치되기 위해서는 두 오차가 중계기 송신신호에 모두 반영되어야 한다. 그림 2에 주파수 일치 알고리즘의 적용 예를 제시하였다.

반송파 복원 후의 기저대역 신호에는 반송파 오차가 제거되어 있지만 루프필터 출력이 반송파 오차이므로 이 정보를 재 변조 과정의 주파수 변환에 사용하면 송수신신호는 동일한 반송파 주파수 오차를 가진다. 변조된 신호에 반송파 오차를 추가할 때는 반드시 주파수 반전기를 사용하여야 한다. 반송파 복원부의 수직제어발진기는 입력신호의 반송파 오차( $-\Delta f_c$ )와 부호가 반대인 발진신호( $\Delta f_c$ )를 생성하므로 발진신호의 부호를 반전시켜 변조신호에 추가하여야 송수신신호가 그림

3과 같이 동일한 반송파 주파수 오차를 갖게 된다.

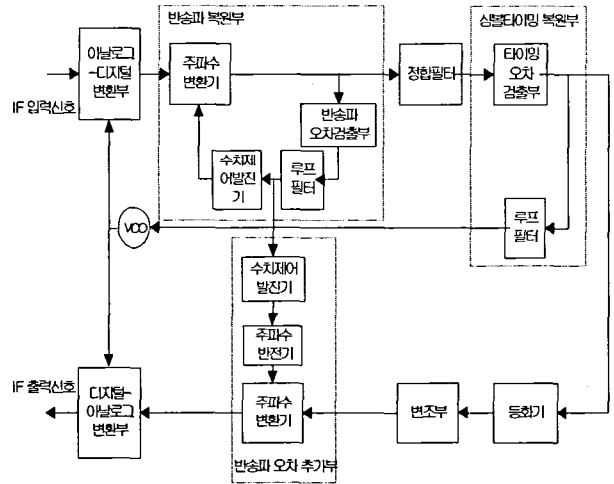


그림 2. 주파수 일치 알고리즘의 적용

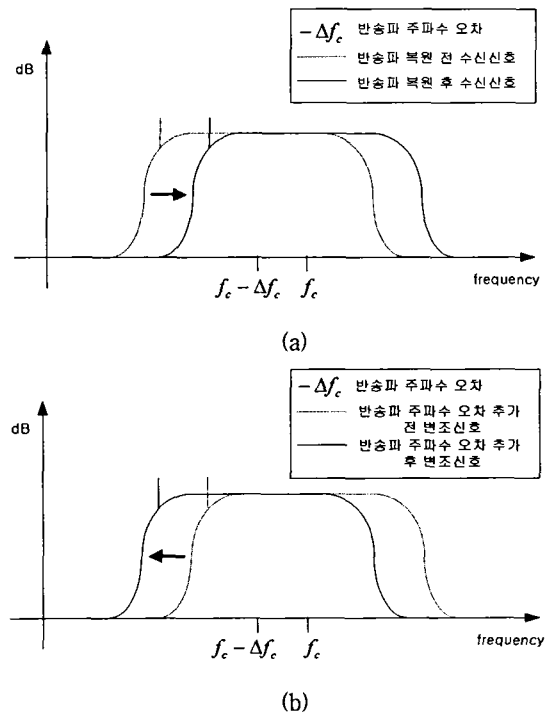


그림 3. 송수신부의 반송파 주파수 오차 (a) 수신부의 반송파 주파수 오차 보상 (b) 송신부의 반송파 주파수 오차 추가

심볼타이밍 복원 후의 기저대역 신호에는 심볼타이밍 오차가 제거되어 있지만 루프필터 출력이 심볼타이밍 오차이므로 이 정보를 재 변조 과정의 아날로그-디지털 변환에 사용하면 송수신 신호는 동일한 심볼타이밍 주파수 오차를 가진다. 심볼타이밍 주파수 일치는 반송파 주파수 일치와 달리 송수신부의 VCO를 공유함으로써 간단히 구현될 수 있다.

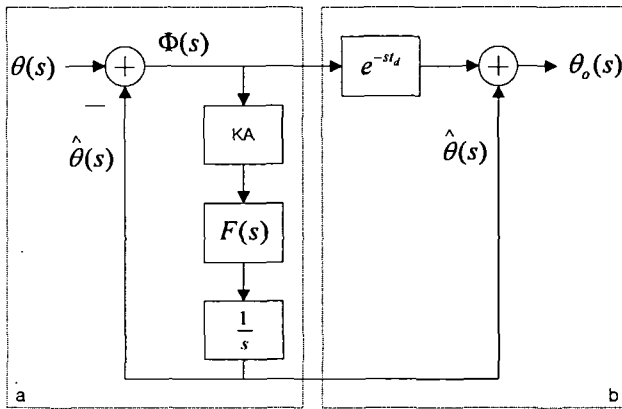
송수신신호의 주파수 일치에 있어서 두 신호간의 위상은 일치시킬 필요가 없다. 동기복원에서 획득된 동기정보는 등화기와 정합필터를 거친 후의 신호에 반영되므로 그 사이의 시간지연으로 인해 위상 오차를 정확히 반영할 수가 없다. 또한, 위상을 정확히 일치시켰다 하더라도 경로지연과 채널환경에 따라 중첩지역의 수신기에 수신되는

중계신호와 주 송신신호 사이에는 항상 위상 오차가 존재하며, 이 위상 오차는 수신기의 수신성능에 크게 영향을 주지 않는다.

주파수 일치에 있어서 중요하게 고려되어야 중요한 사항 중의 하나는 중계기 송신신호의 위상잡음이다. 등화형 동일채널중계기 출력신호의 위상잡음에는 발진기 자체의 위상잡음이나 아날로그 주파수 변환 시에 발생하는 위상잡음 외에 동기복원 과정에서 발생하는 위상잡음이 추가 된다. PLL의 루프필터 대역폭을 너무 크게 할 경우 중계기 송신신호의 위상잡음이 커질 수 있으므로 중계기의 동기복원 성능을 고려하여 적당히 설정하여야 한다. 제안한 알고리즘이 적용된 등화형 동일채널중계기에서는 FCC 위상잡음 마스크를 만족하도록 루프필터 대역폭을 설정하였다.[3]

### 3. 등가모델 분석

그림 4는 제안한 알고리즘의 아날로그 등가모델이며 반송파 주파수 일치와 심볼타이밍 주파수 일치 모두에 적용될 수 있다. 일반적인 PLL 등가모델을 바탕으로 주파수 일치 알고리즘을 포함한 등가모델을 제시하고, PLL이 안정화 된 후의 등화형 동일채널중계기의 입력신호와 출력신호간의 주파수가 일치되고 위상 오차만 존재함을 보인다.



$$\theta(t) = \Delta\omega t \xrightarrow{L} \theta(s) = \Delta\omega/s^2$$

그림 4. 아날로그 등가모델

그림 4의 a는 일반적인 PLL의 등가모델이며 b는 간략화된 재 변 조부의 등가모델이다.[4] 그림 4에서와 같이  $\theta(t)$ 가 주파수 오차를 가진다고 가정한 후  $\theta(s)$ 와  $\theta_o(s)$ 의 차를  $\Phi(s)$ 로 정의하여 등가모델을 라플라스 변환 영역에서 수식화 하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_o(s) &= \theta_o(s) - \theta(s) \\ &= \Phi(s)e^{-st_d} + \hat{\theta}(s) - \theta(s) \\ &= \Phi(s)(e^{-st_d} - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

루프필터  $F(s)$ 가 0에서 최소한 한 개의 pole을 가진다고 가정하고 final value theorem을 이용하여 정적상태(steady-state)에서  $\Phi_o(t)$ 의 값을 구하면 식 (2)의 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \Phi_o(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi_o(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s\Phi(s)(e^{-st_d} - 1) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \theta(s) \cdot \frac{(e^{-st_d} - 1)}{1 + KAF(s)/s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{\Delta\omega}{s^2} \cdot \frac{(e^{-st_d} - 1)}{1 + KAF(s)/s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \Delta\omega \cdot \frac{(e^{-st_d} - 1)}{s + KAF(s)} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 결과에서 나타나듯이 PLL이 안정화 된 후  $\theta(t)$ 와  $\theta_o(t)$ 의 위상 차이는 존재하지 않는다. 기저대역 신호  $x(t)$ 를 고려하면 입력신호는  $x(t)e^{j\Delta\omega t}$ 로 출력신호는  $x(t-t_d)e^{j\Delta\omega t}$ 로 표현할 수 있으며 두 신호의 위상차가  $-\Delta\omega t_d$ 임을 알 수 있다.

### 4. 시스템 성능

제안한 주파수 일치 알고리즘은 등화형 동일채널중계기에 적용되어 하드웨어로 구현되었다. 본 장에서는 하드웨어로 구현된 시스템에서 수신신호와 송신신호의 주파수 일치 여부를 검증한다.

#### 가. 주파수 일치 분석

등화형 동일채널중계기 입력신호와 출력신호의 합은 식 (3)으로 표현할 수 있으며 이 식의 주파수 영역으로 변환하여 스펙트럼 특성을 분석한다.

$$y(t) = x(t)e^{j\Delta\omega t} + \alpha \cdot x(t-t_d)e^{j\Delta\omega t} \quad (3)$$

식 (3)을 주파수 영역으로 변환하여 절대값을 취하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} |Y(w)| &= |X(w - \Delta\omega) + \alpha \cdot X(w - \Delta\omega)e^{-j(wt_d - \Delta\omega t_d)}| \\ &= |X(w - \Delta\omega)| \cdot |1 + \alpha \cdot e^{-j(wt_d - \Delta\omega t_d)}| \end{aligned} \quad (4)$$

절대값의 크기는 주파수 영역에서  $\frac{2\pi}{T_d}$ 의 주기로 최대값과 최소값이 번갈아 나타나고 최대값과 최소값의 위치는 항상 일정함을 알 수 있다.

#### 나. 시스템 성능

그림 5는 중계기의 수신신호와 송신신호의 합을 벡터신호분석기(VSA)로 측정된 것이며 30분간의 평균값을 취한 결과이다. 스펙트럼의 최대값과 최소값의 위치와 깊이에 변함이 없으므로 두 신호간의 주파수 차이가 없음을 알 수 있다.

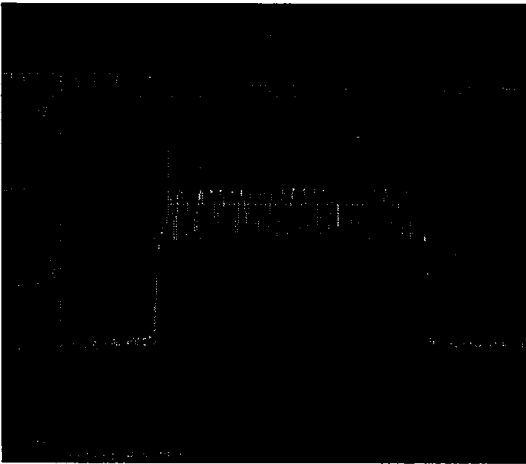


그림 5. 중계기의 송수신신호 주파수가 일치된 경우 스펙트럼

그림 6은 등화형 동일채널중계기 출력신호의 위상잡음을 RFA 300A를 이용하여 측정된 결과이며 FCC 마스크 기준을 만족함을 알 수 있다. 위상잡음은 PLL의 루프필터 대역폭과 밀접한 관계가 있으며 대역폭을 넓힐수록 위상잡음이 커지게 된다.

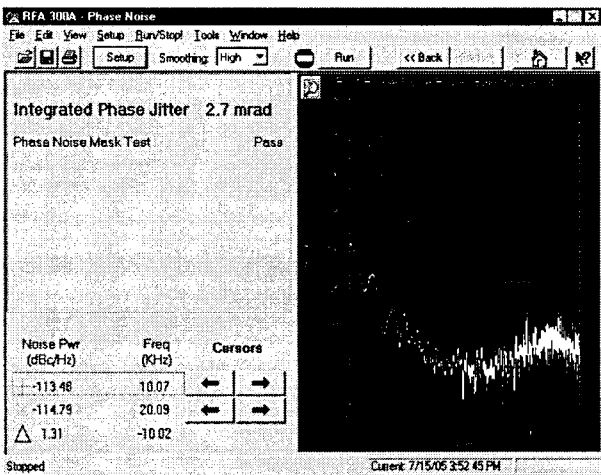


그림 6. 등화형 동일채널중계기 출력신호의 위상잡음

## 5. 결론

본 논문에서는 ATSC 지상파 디지털 방송신호를 중계하는 등화형 동일채널중계기에 있어서 주 송신신호의 동기복원 과정에서 획득한 주파수 오차정보를 재 변조 과정에 사용함으로써 GPS와 같은 별도의 장치 없이 송수신신호의 주파수를 일치시키는 방법을 제시하였다. 제안한 알고리즘을 하드웨어로 구현하여 송수신신호의 주파수를 비교한 결과 두 신호의 주파수가 일치하였고 중계기 출력신호의 위상잡음 또한 FCC 마스크를 만족하였다.

## 6. 참고문헌

[1] 박성익, 음호민, 이용태, 김홍목, 서재현, 김형남, 김승원, "ATSC 지상파 디지털 TV 방송의 단일 주파수 망 구성을 위한 등화형 동일 채널 중계기," 방송공학회논문지, 제9권, 제4호, pp. 371~383, 2004년.

- [2] 박성익, 이용태, 음호민, 서재현, 김홍목, 김승원, "등화형 동일 채널 중계기 - Part2 : 필드 테스트 결과," 방송공학회논문지, 제10권, 제2호, pp. 221~237, 2005년.
- [3] Transmission Measurement and Compliance for Digital Television, Doc. A/64 Rev. A, May, 2000.
- [4] Heinrich Meyr, Synchronization in Digital Communications, John Wiley & Sons, 1990.