

Random Telegraph Signal에 의한 1/f 잡음이 CMOS Ring Oscillator의 Phase Noise와 Jitter에 미치는 영향

박세훈* · 박세현* · 이정환* · 노석호*

*안동대학교

The effect of 1/f Noise Caused by Random Telegraph Signals on The Phase Noise and The Jitter of CMOS Ring Oscillator

Se-Hoon Park* · Se-Hyun Park* · Jeong-Hwan Lee* · Seok-Ho Noh*

*Andong National Univerity

E-mail : separk@andong.ac.kr

요 약

Random Telegraph Signal(RTS)에 의한 1/f 잡음이 CMOS Ring Oscillator의 Phase Noise와 Jitter에 미치는 영향을 조사한다. 7단 Ring Oscillator의 각 노드에 병렬 연결된 10개의 Piece-Wise-Linear 전류원이 RTS 신호를 모델링 한다. RTS 전류원의 진폭과 Time Constant를 변화시키면서 Ring Oscillator 출력의 FFT 및 전력 스펙트럼 밀도, Jitter를 관찰한다. RTS 전류원의 진폭은 Phase Noise의 폭을 증가시키고 결과적으로 Jitter의 크기도 증가 시키는 것이 확인 되었다. 그리고 RTS Time Constant가 짧아질수록 출력 신호의 FFT peak의 폭이 커지고 Cycle to Cycle Jitter 값이 증가 하였다.

ABSTRACT

The effect of 1/f noise by the random telegraph signal(RTS) on the phase noise and the jitter of CMOS ring Oscillator is investigated. 10 parallel piece-wise-linear current sources connected to each node model the RTS signals. The FFT, the power spectral density and the jitter of output of the ring oscillator are simulated as functions of the amplitude and time constant of RTS current source. It is confirmed that the increase of amplitude of RTS is directly related to the increase of the width of phase noise and the value of jitter. The shorter the time constant is, the wider width of FFT peak and the larger value of cycle to cycle jitter are.

키워드

1/f 잡음, Random Telegraph Signal, Cycle Jitter, Cycle to Cycle Jitter

1. 서 론

MOSFET의 1/f 잡음은 채널의 캐리어 전하와 산화막내의 에너지 준위의 상호작용에 의해 발생한다. 1개의 전하와 에너지 준위의 상호작용은 Random Telegraph Signal(RTS)을 만들고 다수의 RTS의 합이 주파수 영역에서 1/f 잡음을 일으키는 것으로 알려져 있다[1].

본 논문에서는 7단 Ring Oscillator의 각 노드에 10개의 Piece-Wise-Linear 전류원을 병렬로 연결하여 RTS 신호를 모델링 한다.

Ring Oscillator는 TSMC CMOS 0.18 μ m 공정을 이용하여 설계 되었고, 7 단의 CMOS 인버터로 구

성되어 1 GHz의 구형파를 출력한다. 1/f 잡음을 모델링하는 RTS는 각 노드에 10개 씩 병렬로 연결되어 있다. RTS는 지수함수 분포를 가지는 time constant와 진폭으로 규정되는 전류원이다. 각 노드에 RTS 전류원에 의해 공급되는 전하는 Ring Oscillator 출력에 Phase Modulation을 일으키고 Phase Noise와 Jitter의 원인이 된다.

II. RTS 진폭 변화에 따른 전력 스펙트럼의 변화

일정한 Time Constant(=1ns)를 가진 RTS의 진

폭이 10μA, 20μA, 30μA로 증가할 때 Ring Oscillator의 출력 FFT의 기준 주파수와 고조파의 peak 값은 감소하면서 Phase Noise와 직접 연관되는 대역폭이 증가함을 알 수 있다(그림 1).

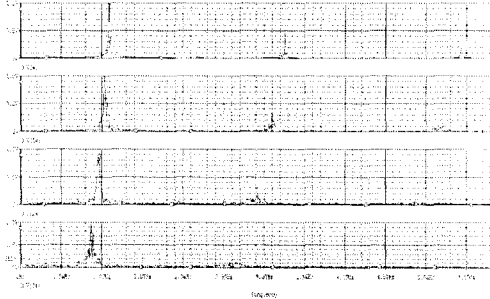


그림 1. RTS 진폭의 증가에 따른 Ring Oscillator 출력의 FFT 변화(위에서부터 0, 10μA, 20μA, 30μA, Time Constant=1nsec).

그림 2에서는 RTS의 진폭이 증가함에 따라 기준 주파수의 peak 값이 감소하면서 전력 스펙트럼 (Power Spectral Density:PSD)의 Phase Noise 폭이 증가함을 볼 수 있다. 진폭이 증가함에 따라 기준 주파수가 감소하는 것은 진폭의 증가에 따라 전하의 공급이 많아지고, 따라서 개별 인버터의 지연시간이 증가하기 때문이다. Noise의 진폭에 따라 Ring Oscillator의 주파수가 달라질 수 있음을 보여 준다.

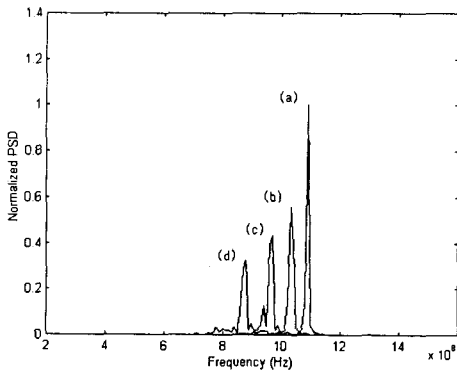


그림 2. RTS의 진폭 변화에 따라 변하는 Normalized PSD vs Frequency (a) No RTS (b) 10μA (c) 20μA (d)30μA

그림 3은 RTS 진폭이 증가함에 따라 PSD의 최대값이 감소하는 경향을 보여 준다. 즉 동일한 전력을 가정할 때 Phase Noise의 폭이 증가함을 보여준다.

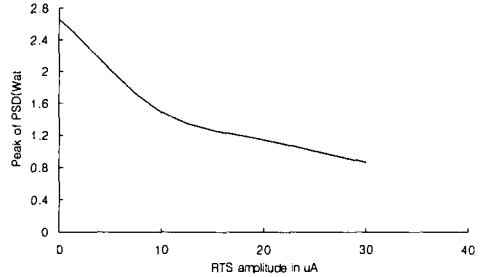


그림 3. RTS의 진폭에 따른 PSD의 최대값 변화

Jitter의 정의에는 일반적으로 Cycle Jitter와 Cycle to Cycle Jitter 두 가지가 있다. 먼저 Cycle Jitter에 대해 설명한다. 신호가 음에서 양의 값으로 변하면서 n 번째 '0'을 지나가는 시간이 t_n 이면 그 순간의 주기 T_n 은 다음과 같이 정의 된다.

$$T_n = T_{n+1} - T_n \quad (1)$$

이러한 주기의 평균을 \bar{T} 라고 할 때, 각 주기와 \bar{T} 의 차이 즉 $\Delta T_n = T_n - \bar{T}$ 은 일반적인 Jitter의 의미를 가진다. 그러나 보다 명확한 jitter의 의미는 ΔT_n 의 rms 값이며 Cycle Jitter라고 정의한다. Cycle jitter, ΔT_c 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta T_c = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta T_n^2} \quad (2)$$

여기에서 N은 계산에 사용된 주기의 개수 이다.

이와는 달리 Cycle to Cycle jitter, ΔT_{cc} 는 인접 주기 사이의 차이에 대한 rms 값이며 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta T_{cc} = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (T_{n+1} - T_n)^2} \quad (3)$$

그림 4는 두 가지 Jitter가 RTS의 진폭이 증가함에 따라 변하는 경향을 보여 준다. Jitter Ratio는 평균 주기에 대한 Jitter의 비율로 다음 식으로 주어진다.

$$JitterRatio = \frac{Jitter}{Period} \quad (4)$$

진폭에 따라 두 가지 Jitter 모두 급격히 증가함을 보여 준다.

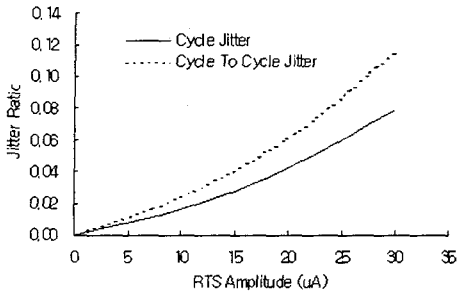


그림 4. RTS 진폭에 따른 Jitter Ratio의 변화

III. Time Constant 변화에 따른 FFT와 Jitter Ratio 변화

그림 5는 RTS Time Constant를 변화시키면서 관찰한 Ring Oscillator의 출력 FFT이다. 이때 RTS의 진폭은 10uA이다. Time Constant가 작은 값일수록 FFT peak가 넓어짐을 볼 수 있다. 짧은 Time Constant가 높은 주파수의 변조 신호에 대응하는 하는 것을 고려하면 위상 변조의 특성으로 이러한 현상을 설명할 수 있다. 위상 변조 신호의 대역폭이 넓을수록 변조된 신호의 FFT peak가 넓어지는 것과 같이 Time Constant가 짧을수록 Ring Oscillator 출력 신호의 FFT가 넓어진다. 결과적으로 Time Constant가 적어질수록 Phase Noise의 대역폭이 증가함을 알 수 있다.



그림 5. RTS Time Constant 변화에 따른 FFT의

변화(위에서부터 100ns, 10ns, 1 ns)

그림 6은 RTS의 Time Constant가 증가함에 따라 변하는 Jitter를 보여준다. Cycle Jitter는 Time Constant가 변함에 따라 거의 일정한 값을 유지한 반면, Cycle to Cycle Jitter는 Time Constant가 증가함에 따라 감소한다. 이러한 관찰에 근거하여 Time Constant가 감소함에 따라 넓어지는 신호의 FFT peak는 시간 영역에서 Cycle to Cycle Jitter로 나타남을 알 수 있다.

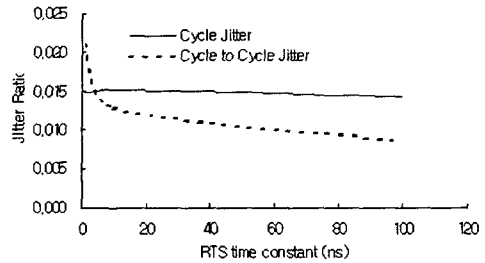


그림 6. RTS Time Constant 변화에 따른 Jitter Ratio의 변화

V. 결 론

CMOS Ring Oscillator에 추가된 RTS 잡음 전류원의 진폭 증가는 주파수 영역에서 Phase Noise 대역폭 증가와 시간 영역에서 Jitter의 크기 증가에 직결되어 있다. 그리고 RTS 잡음 전류원의 Time Constant가 짧을수록 출력 신호의 FFT peak 대역폭이 넓어져 주파수 영역에서 Phase Noise의 대역폭이 증가하고, 시간 영역에서 출력신호의 Cycle to Cycle Jitter가 증가한다.

참고문헌

- [1] M. J. Kirton, M. J. Uren, S. Collins, M. Schulz, A. Karman, and K. Scheffer, "Individual defects at the Si:SiO₂ interface", *Semicond. Sci. Technol.* 4, p1116, 1989.