무선광네트웍(RoF)의 가용 주파수 대역 확장을 위한 광전믹싱 광검파

최영규*

Optoelectronic Mixing Detection for the Extension of Useable Frequency Range in the Radio over Fiber Network

Young-kyu Choi*

요 약

광파이버 네트웍에서 광전믹싱 광검파의 가용 주파수대역 확장을 위한 이론을 제시하고 시뮬레이션을 실시하였다. 광전믹싱 광검파의 정규화 이득을 정의하고, 검파소자의 차단주파수를 초월하는 고주파 영역의 신호도 검파가 가능함을 확인하였다. 포토다이오드 내부의 캐리어 천이에 대한 연속방정식을 풀어서 광전믹싱 현상의 메카니즘을 해석하였다. 정규화 이득은 신호주파수와 차주파수의 크기에 의존하였으나, 포토다이오드에 흐르는 광전류의 크기는 신호주파수와는 무관하였다. 신호 검파효율의 최대화를 위해서는 바이어스 전압과 국부신호의 진폭을 동시에 최적화할 필요가 있다.

ABSTRACT

Theoretical analysis is presented for expending of the usable frequency range of optoelectronic mixing detection in the radio over fiber network system. We define the normalized gain to evaluate the performance of the optical mixing detection, and conform the possibilities of detection for the high frequency signals beyond the cutoff frequency of a photodiode. Optical mixing detection mechanism is analyzed by solving the continuity equation for the carriers of a photodiode. The normalized gain is independent on the signal frequency and the frequency difference between the optical signal and the local signal. Also, the amplitude of the local signal and the bias voltage are needed to be optimized at the same time in order to maximize the normalized gain.

키워드

Optical mixing, photo-detection, frequency conversion, RoF(radio over fiber), APD

* 신라대학교 전자공학과

접수일자 : 2009. 04. 07
심사완료일자 : 2009. 04. 28

Ⅰ. 서 론

최근 무선접속 통신망의 증가 및 정보의 대용량화, 서비스 품질의 향상을 위해 밀리미터파 영역에서 동작하는 RoF(Radio-over-Fiber)시스템에 대한 연구가 주목을 받고 있다[1-2]. 현재 보급되어 있는 RoF 시스템에서 무선신호는 중앙통제국(central station)에서 생성되고 기지국과는 밀리미터파로 변조된 광신호 형태로 정보를 주고받게 되므로, 각 기지국은 밀리미터파 무선신호의 극히 일부만을 사용하게 된다. 따라서 이러한 시스템은 한 개의 통제국이 다수의 기지국을 담당하며, 기지국에서는 광전믹서(optoelectronic mixer)검파방식을 이용하여 광전, 또는 전광변환의 역할만을 수행하면 된다. 마이크로파 영역에서의 변복조 및 채널제어와 같은 복잡한 기능들은 중앙통제국에서 담당하게 된다. 기지국에서 이루어지는 광전변환은 PD나 APD 등의 포토다이오드를 이용하여 여러 가지 형태의 광전믹서를 구성할 수 있으며, 포토파라메트릭 증폭기[3], 마이크로파 국부신호를 발생하는 광전믹싱[4], 강도변조 국부 광신호를 이용하는 광전믹싱[5] 등의 방식이 주로 연구되고 있다.

광전믹싱 검파방식에서 포토다이오드가 검파한 신호에는 상호변조 곱에 의해 합과 차의 주파수 성분이 발생한다. 그림 1에 광전믹싱 검파의 한 예를 보였다. 여기서 주목할 것은 합과 차의 주파수 성분의 활용 방법이다[6]. 지금까지의 연구는 주로 포토다이오드의 검파대역($f < f_c$: 차단주파수 이내) 내의 광전믹싱 검파에 주목하여 왔으며, 이러한 광전믹싱 검파에서는 변환효율이 1보다 작아지므로(100%이하) 직접검파에 비해 검파효율이 매우 낮았다[7-9].

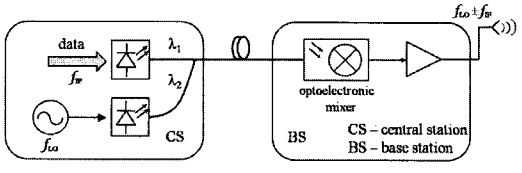


그림 1. RoF 시스템의 광전믹싱 검파의 예
Fig. 1. An example of radio over fiber system.

본 논문에서는 주로 포토다이오드의 차단주파수를 초월한 고주파 영역에서의 광전믹싱에 대하여 다이오드 내부의 캐리어의 흐름에 착목하여 이론해석을 하였다. 특히, 포토다오드 내부에서 일어나는 물리적 현상에 초점을 맞춘 캐리어의 연속방정식을 해석하여 소자의 응답영역을 초월한 고주파 광신호도 검파가 가능함을 밝힌다. 그리고 APD를 검파소자로 이용할 경우 실제 동작이 가능한 수치를 대입하여 수치해석을 실시, RoF 시스템의 광전 믹싱검파가 회로적으로 광소자의 응답영역을 초월한 고주파에 대해서도 확장 적용이 가능한지를 검토한다.

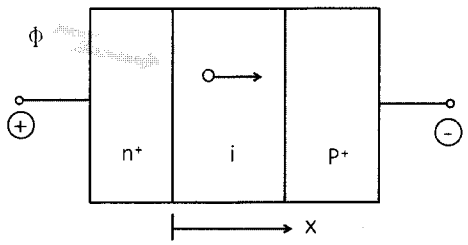


그림 2. 해석에 이용한 포토다이오드의 개형
Fig. 2. Schematic of a photodiode for simulation.

Ⅱ. 이론해석

2.1 직접 광검파

그림 2는 n-i-p 포토다이오드 구조의 개형이다. 변조광은 왼쪽으로부터 DC바이어스 전압이 인가된 포토다이오드에 주입된다. 여기서 경계면 $x=0$ 과 n층, i층 사이에 주입되는 총광전력을 $\psi h\nu$(ψ :초당 주입되는 광자의 수)라 하면, 초당 ψ와 같은 수의 전자-정공쌍이 발생한다. 전자는 인가된 전계에 끌려 급속히 가속되어 고농도로 도핑된 n영역으로 주입된 후 그 이동속도가 떨어지게 된다. 반대로 정공은 v_o의 속도로 오른쪽으로 이동하여 외부전류 $i=\psi e$로 나타난다. 여기서 입력광이 각주파수 ω_s의 신호로 변조되었을 경우, 변조된 광은

$$\psi = \psi_o + \psi_s e^{j\omega_s t} + \psi_s^* e^{-j\omega_s t} \tag{1}$$

되며, 여기서 $\psi_s = |\psi_s| e^{j\phi_s}$이며. 결과적으로 외부에 흐

르는 전류는

$$i = \psi_o e + \psi_s e e^{j\omega_s(t-\pi/\omega_c)} \sin(\omega_s \pi/\omega_c) \quad (2)$$

로 된다. 여기서, $\omega_c = 2\pi v_o/L$, L은 다이오드의 길이이다. $\mathrm{sinc}(\omega_s\pi/\omega_c)$는 캐리어가 다이오드를 주행하는 동안에 발생하는 광검파의 주파수 특성을 나타낸다. 주파수특성의 응답은 주파수가 $f_s = f_c \equiv v_o/L$에서 0으로 떨어지게 된다. 이러한 주파수를 초월하는 고주파 영역의 광신호를 검출하려면 다음과 같은 광전믹싱 광검파를 이용하면 된다.

2.2 광전 믹싱 광검파

포토다이오드에 주파수 ω_l의 국부신호로 변조한 DC바이어스 전압을 인가하면, 다이오드에 걸리는 전계는

$$E = E_o + E_l e^{j\omega_l t} + E_l^* e^{-j\omega_l t} \quad (3)$$

로 쓸 수 있다. 각주파수 ω_s로 변조된 광이 포토다이오드에 주입되었을 때 발생하는 정공의 수 $p(0)$는 $\psi e = i = p(0)ev$와 $v = \mu E$의 관계에서

$$p(0) = \psi/v \quad (4)$$
$$= \left(\psi_0 + \psi_s e^{j\omega_s t} + \psi_s^* l e^{-j\omega_- t} + \cdots\right)/v_0$$

가 된다. 여기서, $l = E_l/E_0$이며, $\omega_- = \omega_l - \omega_s$ 이다. 이러한 정공의 이동속도는 국부신호 전계 $E_l e^{j\omega_l t}$에 의해서 변조가 일어나게 되어 결과적으로 다이오드 내의 정공의 밀도는

$$p = \bar{p} + p_s e^{j\omega_s t} + p_- e^{j\omega_- t} + p_-^* e^{-j\omega_- t} + \cdots + c.c. \quad (5)$$

로 나타나게 된다. 식(3)과 식(5)를 연속방정식에 대입하면

$$\partial p/\partial t = -\mu_p E \partial p/\partial x + D_p \partial^2 p/\partial x^2 - (p - p_0)/\tau_p \quad (6)$$

이 된다. 여기서 정공의 수명 τ_p는 인가하는 신호 주파수의 주기에 비하여 매우 긴 것으로 가정하여 재결합하는 성분은 무시하였다. 여기서는 계산의 편의상 확산계수 D_p에 의한 효과도 생략하였다. 식(6)이 시간에 관계없이 성립하기 위해서는 시간에 의존하는 계수(지수함수들)들이 좌우평형을 이루어야 한다. 따라서 각주파수 ω_s와 ω_- 성분에 관한 정공의 수는

$$j\omega_s p_s = -\mu E_0 \partial p_s/\partial x - \mu E_l \partial p_-^*/\partial x \quad (7)$$
$$j\omega_- p_- = -\mu E_0 \partial p_-/\partial x - \mu E_l \partial p_s^*/\partial x \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 위 두식을 행렬로 표시하면,

$$\begin{bmatrix} j\omega_s & 0 \\ 0 & -j\omega_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ p_-^* \end{bmatrix} = -v_0 \begin{bmatrix} 1 & l \\ l^* & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} p_s \\ p_-^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

이 되고 여기서, $v_0 = \mu E_0$ 이다. 식(9)의 행렬식을 정공의 공간분포에 대하여 풀면,

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} p_s \\ p_-^* \end{bmatrix} \approx \frac{v_0^{-1}}{1-|l|^2} \begin{bmatrix} -j\omega_s - j\omega_- l \\ j\omega_s l^* \quad j\omega_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_s \\ p_-^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

이 된다. 식(10)은 유전체 도파로 해석의 모드결합 이론의 식과 같은 형태로서 이 식의 해는

$$p_s(x) = e^{-j\beta_a x} \left\{ p_s(0) \left(\cos\beta_b x - j\frac{\beta_d}{\beta_b} \sin\beta_b x \right) - p_-^*(0) \frac{jc_{12}}{\beta_b} \sin\beta_b x \right\} \quad (11)$$

$$p_-^*(x) = e^{-j\beta_a x} \left\{ p_-^*(0) \left(\cos\beta_b x - j\frac{\beta_d}{\beta_b} \sin\beta_b x \right) - p_s(0) \frac{jc_{21}}{\beta_b} \sin\beta_b x \right\} \quad (12)$$

로 된다. 여기서,

$$\beta_d = \frac{\omega_s - \omega_-}{2v_0}, \quad \beta_b = \sqrt{\beta_d^2 - |l|^2 \omega_s \omega_- / v_0^2},$$

$$c_{12} = -\frac{l}{1-|l|^2}\frac{\omega_-}{v_0},\ c_{21} = -\frac{l}{1-|l|^2}\frac{\omega_-}{v_0}$$

이다. 이 결과에 의해서 각주파수 ω_s성분의 전류는

$$i_s(\omega_s) = pev|_{\omega_s} = p_s(x)e\mu E_0 + p_-^*(x)e\mu E_l \quad (13)$$

이 되고, 다이오드 전체에 대하여 적분을 취하면 ω_s성분의 전류

$$J_s \approx \psi e e^{-j\omega_s\pi/\omega_c}\mathrm{sinc}\frac{\omega_s}{\omega_c}\pi \quad (14)$$

이 된다. 이 결과는 $|l|^2 < 1$ 조건을 사용하여 근사식으로 표현하였으며, 식(4)에서 이용한 초기조건 $p_s(0) = \psi_s/v_0, p_-(0) = \psi_s^* l/v_0$ 을 사용하였다.

같은 방법으로 각주파수 ω_-성분의 전류는

$$i(\omega_-) = pev|_{\omega_-} = p_-(x)e\mu E_0 + p_s^* e\mu E_l \quad (15)$$

가 되고, 광전믹싱 결과로 검파된 전류는 최종적으로

$$J_- = -\psi^* el\frac{\omega_-}{w_l}\left(e^{-j\omega_-\pi/\omega_c}\mathrm{sinc}\frac{\omega_-}{\omega_c}\pi - e^{j\omega_s\pi/\omega_c}\mathrm{sinc}\frac{\omega_s}{\omega_c}\pi\right) \quad (16)$$

가 된다. 이 결과에서 광전믹싱 검파된 주파수성분은 다이오드에 인가된 국부신호의 크기 $l = E_l/E_0$ 에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 식(14)에 보인 것처럼 직접검파된 ω_s성분의 전류는 $f_s = f_c = v_0/L$에서 완전히 소멸하며, 식(16)의 마지막 항 역시 이러한 조건에서 0이 된다. 그러나 일반적으로 $\omega_- \neq \omega_s$이므로 첫 번째 항은 0이 되지 않는다. 이러한 결과는 포토다이오드가 ω_s성분의 직접검파가 불가능한 경우에도 캐리어의 천이에 기인하는 광전믹싱 검파에 의해서 주파수 변환된 ω_-성분으로 광검파가 가능하다는 것을 알 수 있다. 여기서 주파수 변환된 ω_-성분과 직접검파된 ω_s성분의 비를 변환이득으로 정의하면 이 변환이득은 f_c에서 무한히 커지게 된다. 그러나 실제의 동작에서는 다이오드의 내부 접합용량 등의 제한으로 무한히 증가하지는 않는다.

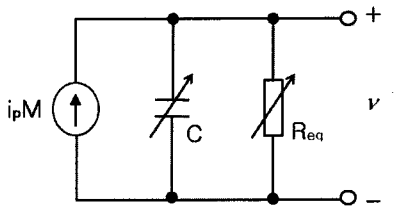


그림 3. 시뮬레이션에 이용한 APD의 등가회로
Fig. 3. The equivalent circuit of APD.

그림 3은 그림 2의 포토다이오드를 APD의 경우를 상정하여 등가회로로 나타낸 그림이다. 그림 3의 등가회로에서 등가저항 R_{eq}에 나타나는 전압을 구하기위해서는 전류방정식

$$I(t) + \frac{d(Cv)}{dt} + \frac{v}{R_{eq}} = 0 \quad (17)$$

을 풀면 된다. 식(17)에 식(14) 또는 식(16)을 대입하면 각 주파수성분의 전류에 대한 주파수특성을 구할 수 있다. 식(17)에서 알 수 있듯이 각 주파수 성분의 캐리어 천이에 의한 주파수특성에 더하여 실제의 회로의 동작에서는 커패시턴스의 주파수특성에 부가되므로 광전믹싱에 의한 변환이득이 무한히 커지지는 않는다. 한편, APD의 경우에는 그림 3처럼 증배계수 M에 의한 비선형효과를 변환이득의 반영하면 된다.

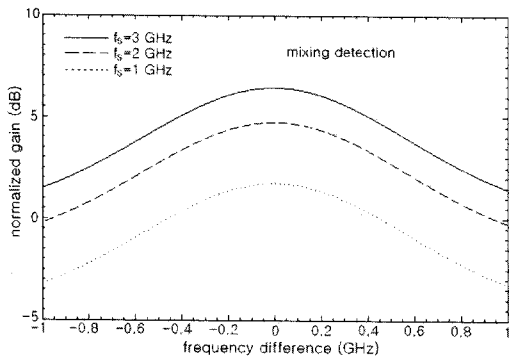
표 1. 시뮬레이션에 이용한 파라메터 값
Table. 1. The value of parameters for simulation.

Responsivity R	0.85 A/W
Breakdown voltage V_B	165 V
Equivalent resistance R_{eq}	50 Ω
Input optical power P_o	20 μW
Junction capacitance C_1	5 pF
Cut-off frequency of the APD	640 MHz
Bias voltage V_b	160 V
Local signal voltage V_l	4.5 V

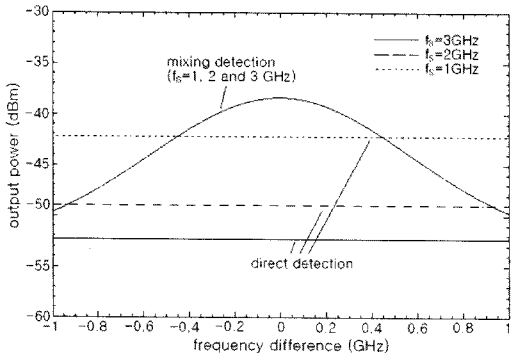
Ⅲ. 시뮬레이션

3.1 광전믹싱 검파의 주파수특성

그림 4는 여러 가지 변조 주파수 f_s에 대하여 차주파수 f_-의 정규화 이득과 검파회로의 출력 $V_s^2/2R_{eq}$의 관계이다. 변조신호의 주파수가 높을수록 정규화 이득이 증가하고, 변조신호의 주파수가 일정 주파수 이상으로 높아질 때 정규화 이득이 1보다 커지는 것을 알 수 있다. $f_s = 1$GHz에서 약 2dB, $f_s = 3$GHz에서는 약 6dB 이상으로 증가한다. 그림 4(a)에서 차주파수 성분이 작을수록 정규화 이득이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 4(b)는 차주파수에 대한 검파회로의 출력파워 $V_s^2/2R_{eq}$의 관계이다.



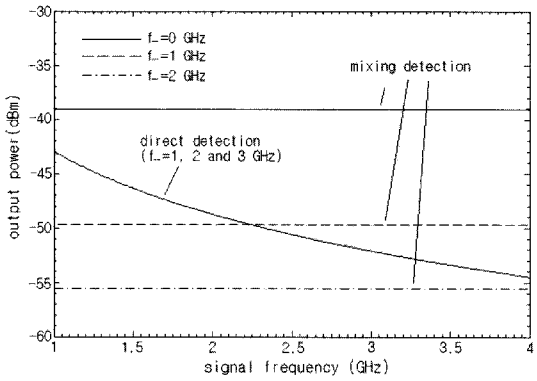
(a)



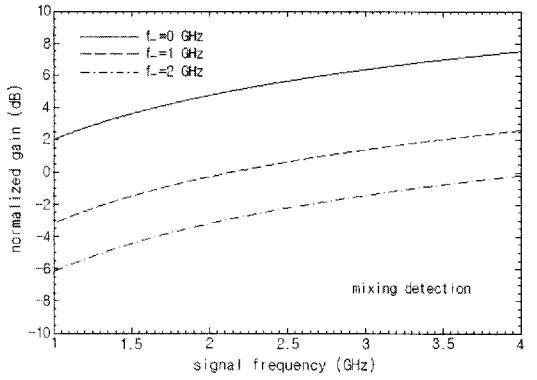
(b)

그림 4. 차주파수 성분의 출력특성
(a) 정규화 이득 (b) 출력 파워
Fig. 4. Output characteristics of the different signal frequencies. (a) normalized gain (b) output power

직접검파 출력은 차주파수의 크기와는 관계없으나, 식 (2)와 같이 신호주파수의 크기와는 밀접한 관계가 있다. 그림 5(a)를 보면 차주파수의 크기가 일정할 경우변조 주파수의 높은 차주파수 신호일수록 정규화 이득이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 5(b)는 신호주파수와 출력파워의 관계이다. 신호주파수가 높아질수록 직접검파의 출력이 광전믹싱 검파의 출력보다 작아진다. 신호주파수가 APD의 차단주파수 보다 높아지면 신호의 출력파워는 급격히 줄어들게 되므로 실제 상황에서는 광전믹싱 검파의 이득이 그림 4나 그림 5의 시뮬레이션 결과보다 훨씬 더 커질 수도 있다.



(a)



(b)

그림 5. 광변조신호 주파수의 출력특성
(a) 정규화 이득 (b) 출력 파워
Fig. 5. Output characteristics of the optical signal frequencies. (a) normalized gain (b) output power

이 결과에서 광전믹싱 광검파를 이용하면 포토다이오드의 차단주파수 이상의 고주파 영역까지 가용 주파수 대역의 확장이 가능함을 알 수 있다.

3.2 바이어스 동작점과 국부신호의 진폭

여러 가지 신호주파수에 대하여 국부신호의 진폭 V_l과 광전믹싱 검파의 특성과의 관계를 살펴보자. 먼저, 그림 6(a)는 국부신호와 정규화 이득과의 관계이다. 어떠한 주파수에서도 국부신호의 진폭이 증가하면 정규화 이득도 비례하여 증가한다. APD의 경우 V_l이 커질수록 비선형성이 강해지므로 증배계수나 접합용량 등에 대한 영향이 증가하게 된다. 정규화 이득은 신호주파수와 차주파수가 일정할 경우 국부신호의 크기에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

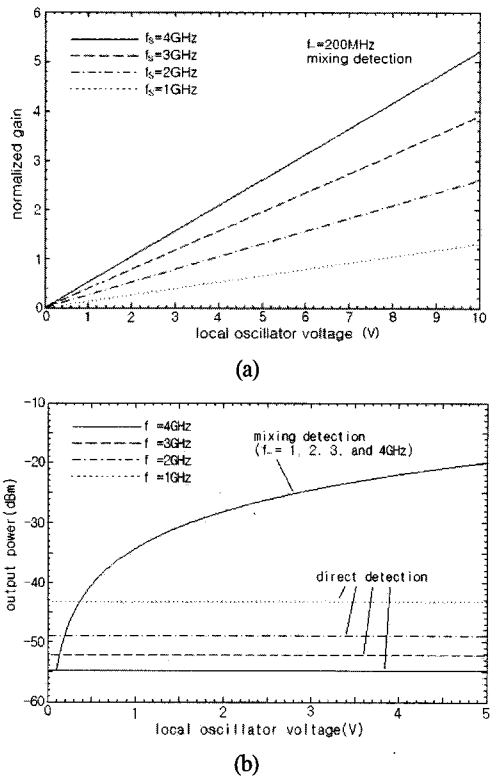


그림 6. 광전믹싱검파에서 국부신호 전압의 영향
(a) 정규화 이득 (b) 출력 파워
Fig. 6. The Influence of the local voltage in optical mixing detection. (a) normalized gain (b) output power

그림 6(b)에서 국부신호의 증가에 따라 검파출력도 증가하지만 어느 임계값부터는 포화되는 것을 알 수 있다. 한편, 차성분의 크기가 일정한 경우 직접검파 성분의 출력보다 믹싱검파의 출력파워가 커지는 임 계값이 존재하는 것을 알 수 있다. 그리고 국부신호 전압이 일정한 경우 출력의 크기는 바이어스 전압에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 관찰한 국부신호 크기의 영향과 동일한 결과이다.

출력특성은 그림 7처럼 특히 낮은 주파수 영역의 차주파수일수록 비대칭성이 확연하다. APD를 광전믹서로 이용할 경우 믹싱검파의 특성은 주로 APD의 증배계수에 의한 영향이 지배적이다. 그러나 바이어스 전압이 낮은 경우에는 내부 커패시턴스의 영향이 지배적으로 나타난다. 비대칭성은 증배계수와 접합용량의 두 가지의 요인에 기인한 다는 것을 알 수 있다. 같은 이유로 바이어스 전압이 일정한 경우에는 국부신호가 증가하여도 비대칭성이 나타나는 것을 예측할 수 있다.

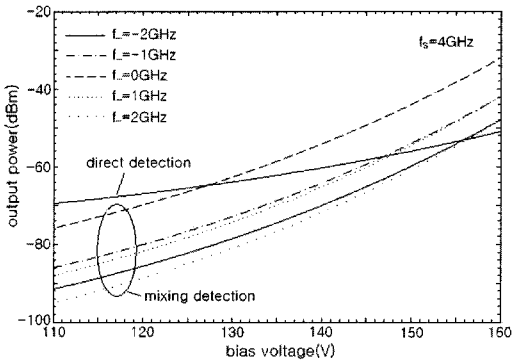


그림 7. 바이어스 전압과 출력 비대칭의 관계
Fig. 7. Asymmetric properties of the output and bias voltage.

그림 8에는 국부신호 전압과 정규화 이득과의 관계를 보였다. 정규화 이득을 최대로 하기 위해서는 최적의 국부신호 전압이 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 광전믹싱 검파는 소신호 동작영역에서 유효하며, 정규화 이득을 최대로 하기 위해서는 바이어스 전압과 국부신호 진폭의 최적화가 필요하다는 것을 알 수 있다.

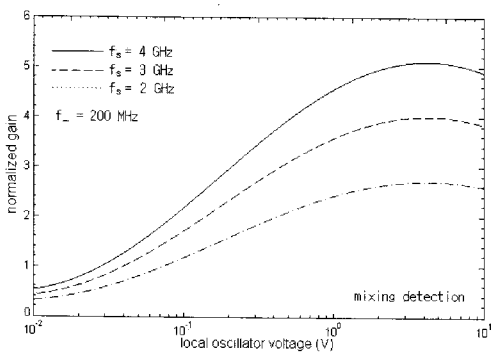


그림 8. 국부신호 전압과 규격화 이득의 관계
Fig. 8. Normalized gain versus local signal voltage.

Ⅳ. 결론

시뮬레이션 결과는 앞서 보고한 다이오드의 전기적 등가회로의 해석결과[10]와 일치하였다. 즉, 광전믹싱의 메카니즘 해석에 있어 등가회로를 이용한 거시적 해석의 결과는 캐리어의 천이에 착목한 다이오드 내부의 미시적 현상을 그대로 반영하는 결과로 나타났다. 다이오드 캐리어의 흐름에 주목한 연속방정식의 해석과 시뮬레이션의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) APD의 광전믹싱 검파의 출력은 신호주파수와는 관계없다는 사실에서 실제의 RoF 시스템에서 차단주파수 영역을 초월하는 높은 주파수의 부반송파를 이용하여 신호의 전송이 가능하다.
2) 광전믹싱 검파의 변환이득의 최대화를 위해서는 차주파수가 작아지도록 변복조 시스템을 설계할 필요가 있다.
3) 신호주파수가 높을수록 변환이득이 커지므로 포토다이오드의 차단주파수를 초월한 고주파 부반송파를 이용한 신호 전송이 가능하다.
4) 믹싱검파의 변환이득을 최대화하기 위한 최적의 바이어스전압과 국부신호 진폭 값이 존재한다.

향후에는 이러한 광전 믹싱검파 방식을 이용하여 실제로 대역을 초월한 영역에서 다중화된 신호를 송수신하는 RoF 시스템에 대한 정량적인 실험을 실시할 예정이다.

참고문헌

[1] T. Kuri and K. Kitayama, "Optical heterodyne detection technique for densely multiplexed millimeter-wave-band radio-on-fiber systems," J. Lightw. Technol., vol. 21, no. 12, pp. 3167-3179, Dec. 2003.

[2] M. Ogusu, K. Inagaki, Y. Mizuguchi, and T. Ohira, "Multiplexing of millimeter-wave signals for fiber-radio links by direct modulation of a two-mode locked Fabry-Perot laser," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 52, no. 2, pp. 498-507, Feb. 2004.

[3] A. Khanifar and R. Green, "Photoparametric amplifiers for Eng.-Optoelectron., vol. 146, no. 5, pp. 223-230, May 1999.

[4] G. Jaro and T. Berceli, "A new high-frequency optical-microwave mixing approach," J. Lightw. Technol. Vol. 21, no. 12, pp. 3078-3084, Dec. 2003

[5] B. Galwas, J. Dawidchyk, A. Chizh, and S. Malyshev, "Modeling of responsivity of InP-pin photodiode for studying optoelectronic frequency conversion process," in Proc. 8th Eur. Gallium Arsenide Other Semicond. Appl. Symp., Oct. 2000.

[6] T. Hishida and M. Tsuchiya, "Broad-band millimeter-wave upconversion by nonlinear photodetection using a waveguide photodiode," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 6, pp. 860-862, Jun. 1998.

[7] M. Tsichiya and T. Hishida, " Nonlinear photodetection scheme and ite system applications to fiber-optic millimeter-wave wireless downlinks," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 47, no. 7, pp. 1342-1350, Jul. 1999.

[8] S. Malyshev, B. Glawas, A. Chizh, J. Dawidczyk, and V. Andrievski, "Frequency conversion of optical signals in p-i-n photodiodes," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, no. 2, pp. 439-443, Feb. 2005.

[9] S. Malyshev and A. Chizh, "Optoelectronic mixer for radio-on fiber systems," in Proc. 35th Eur. Microw. Conf., Oct. 2005, vol. 1, pp. 61-64.

[10] Y. K. Choi, "Frequency characteristics of Electronic mixing optical detection using APD for RoF network", Trans. of KIEE, vol.58. no.7, pp.1386-1392, Jul. 2009.

저자소개

최영규(Young-Kyu Choi)

1981년 중앙대학교 공과대학
전자공학과 공학사
1988년 교토대학(일본)대학원
전자공학과 공학석사
1992년 동 대학원 공학박사
1992~1995 국립 후쿠이대학(일본) 전임강사
1998년~ 신라대학교 공과대학 전자공학과 교수
※관심 분야 : 초고주파, MMIC, 광통신, 광센서