

KHẢO SÁT HIỆU NĂNG (*BER*, *SNR*) CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN DẪN QUANG-VÔ TUYẾN TƯƠNG TỰ (ARoF) VÀ SỐ (DRoF)

Nguyễn Văn Tuấn

Trường Đại học Bách khoa - ĐH Đà Nẵng

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình tiêu biểu của 2 hệ thống truyền dẫn tín hiệu vô tuyến qua sợi quang tương tự ARoF (Analog Radio-over-Fiber) và số DRoF (Digital Radio-over-Fiber) với khoảng cách truyền dẫn $d \leq 120$ km; trình bày tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu (*SNR*) và tỉ lệ lỗi bit (*BER*) trong 2 hệ thống. Trên cơ sở đó, bài báo sử dụng Matlab để vẽ các đồ thị và so sánh hiệu năng của 2 hệ thống theo các kiểu tách sóng trực tiếp và kết hợp sử dụng các phương pháp giải điều chế khác nhau như ASK, FSK, PSK bao gồm các kỹ thuật đổi tần đồng bộ, đổi tần không đồng bộ và đồng tần. Việc so sánh được tiến hành theo nhiều trường hợp khác nhau như thay đổi công suất nguồn phát quang (P_{TX}), d và công suất quang của bộ dao động nội (P_{LO}). Bài báo đã xác định được một cách định lượng mức độ cải thiện *BER* của hệ thống DRoF so với ARoF khi chúng có cùng giá trị của các thông số hệ thống. Tiêu biểu, với $d = 90$ km và $P_{TX} = 1$ dBm, ARoF tách sóng trực tiếp có $BER \approx 10^{-10}$ thì DRoF có *BER* được cải thiện đáng kể ($BER \approx 10^{-23}$). Còn đối với cấu hình PSK đổi tần đồng bộ, tách sóng kết hợp với $d = 100$ km, $P_{LO} = 3$ dBm thì hệ thống ARoF và DRoF có các giá trị lần lượt là $BER \approx 10^{-18}$ và $BER \approx 10^{-23}$.

Từ khóa: *ARoF; DRoF; BER; SNR; ASK; FSK; PSK*

Ngày nhận bài: 12/5/2020; Ngày hoàn thiện: 26/5/2020; Ngày đăng: 29/5/2020

INVESTIGATING PERFORMANCE (*BER*, *SNR*) OF ANALOG RADIO-OVER-FIBER (ARoF) AND DIGITAL RADIO-OVER-FIBER (DRoF) SYSTEMS

Nguyen Van Tuan

DNU - University of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, we present two typical models of Analog Radio-over-Fiber (ARoF) and Digital Radio-over-Fiber (DRoF) systems that transmission distance is shorter than 120 km. Signal-to-noise ratio (*SNR*) and bit error rate (*BER*) in two systems are shown. Matlab-based programme then is written and run to draw graphs and compare the performance (*BER*, *SNR*) of two systems corresponding to direct detection and coherent detection for various demodulation methods such as ASK, FSK, PSK including synchronous, asynchronous heterodyne and homodyne techniques. The performance comparison of the two systems is conducted in many different cases such as changing optical power of transmitter (P_{TX}), transmission distance (d), optical power of local oscillator (P_{LO}). We quantitatively determine the *BER* improvement of DRoF system compared to ARoF when they have the same value of system parameters. Typically, with $d = 90$ km and $P_{TX} = 1$ dBm, Direction-Detection ARoF system has *BER* value of $\approx 10^{-10}$, DRoF system has a greatly improved *BER* value ($BER \approx 10^{-23}$). As for Coherent-Detection synchronous heterodyne PSK configuration with $d = 100$ km, $P_{LO} = 3$ dBm, ARoF and DRoF systems achieve *BER* value of $\approx 10^{-18}$ and of $\approx 10^{-23}$ respectively.

Keywords: *ARoF; DRoF; BER; SNR; ASK; FSK; PSK*

Received: 12/5/2020; Revised: 26/5/2020; Published: 29/5/2020

1. Giới thiệu

Những năm gần đây và trong tương lai không xa, nhu cầu thông tin di động thế hệ mới đa dịch vụ băng thông rộng tăng lên nhanh chóng. Theo dự báo trong sách trắng của tập đoàn Cisco [1], lưu lượng dữ liệu di động toàn cầu sẽ tăng gấp 7 lần từ năm 2017 đến năm 2022, với tốc độ tăng trưởng là 46% đạt 77,5 exabyte mỗi tháng vào năm 2022 (một exabyte bằng một tỉ gigabyte). Trong đó, lưu lượng truy cập từ thiết bị không dây và thiết bị di động sẽ chiếm 71% tổng lưu lượng IP vào năm 2022. Còn theo dự báo của tập đoàn Ericsson [2], đến năm 2025, lưu lượng dữ liệu di động toàn cầu sẽ tăng nhanh chóng và đạt 160 exabyte mỗi tháng, trong đó lưu lượng 5G sẽ chiếm khoảng 45% tổng lưu lượng di động toàn cầu. Tuy nhiên, hệ thống thông tin di động 3G, 4G hiện nay sử dụng các sóng mang vô tuyến nằm ở dải băng tần thấp (khoảng vài GHz) nên chúng mang thông tin dữ liệu tốc độ thấp, băng thông hẹp. Trong bối cảnh đó, các hệ thống sợi quang truyền dẫn trực tiếp tín hiệu sóng vô tuyến tần số cỡ hàng chục GHz, được viết tắt là RoF (Radio over Fiber) trở thành giải pháp hứa hẹn và đầy tiềm năng, cho phép tăng dung lượng lên hàng chục lần so với hiện nay, đáp ứng với nhu cầu gia tăng nhanh chóng của các loại hình đa dịch vụ băng thông rộng 5G và sau 5G trong tương lai. Với ưu điểm vượt trội về băng thông rất rộng của công nghệ quang tử và sợi quang trong việc xử lý và truyền tín hiệu, hệ thống RoF cho phép tăng đáng kể dung lượng, giảm trễ tín hiệu, giảm năng lượng tiêu thụ, chi phí và độ phức tạp của mạng thông tin di động. Ngoài ra, hệ thống còn khai thác các ưu điểm của công nghệ vô tuyến là vùng phủ sóng rộng, khả năng đa truy cập, tính linh động cao. Do đó công nghệ RoF là xu thế ứng dụng tất yếu cho hệ thống thông tin di động thế hệ mới (5G và sau 5G) [3]-[8].

Hệ thống RoF hiện nay được phân thành 2 loại là RoF tương tự (ARoF) và RoF số (DRoF). Trong hệ thống ARoF, tín hiệu vô tuyến ở dạng tương tự điều chế nguồn quang còn trong hệ thống DRoF, tín hiệu vô tuyến

được chuyển đổi thành tín hiệu số trước khi điều chế nguồn quang. Việc số hóa tín hiệu vô tuyến trong hệ thống DRoF như vậy sẽ đem đến hiệu quả tốt hơn, tuy nhiên nó làm cho hệ thống phức tạp và giá thành hệ thống tăng lên. Do đó, để có cơ sở lựa chọn công nghệ tương tự hay số cho hệ thống RoF, nhiều công trình khoa học đã được tiến hành nghiên cứu đặc tính và so sánh đánh giá hai hệ thống ARoF và DRoF, tiêu biểu [8]-[12].

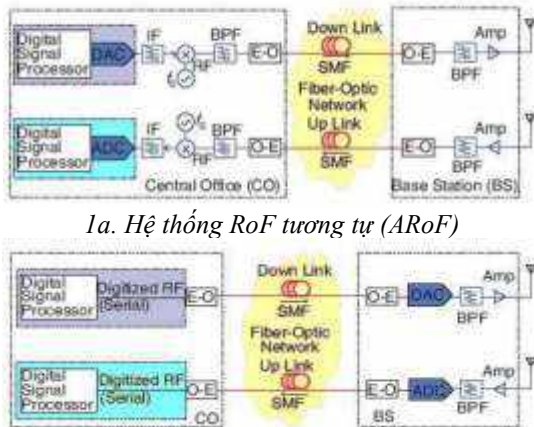
Trong [8], các tác giả so sánh đặc tính của hệ thống ARoF với các phương pháp điều chế vô tuyến BPSK, QPSK và 16QAM, sau đó tiến hành so sánh 2 hệ thống ARoF và DRoF. Kết quả so sánh cho thấy đặc tuyến BER của hệ thống DRoF được cải thiện nhiều so với hệ thống ARoF với cùng các thông số hệ thống. Tuy nhiên, bài báo theo hướng khảo sát sợi quang đa mode (MMF) và chưa đi sâu vào việc khảo sát hiệu quả của DRoF so với ARoF khi thay đổi công suất nguồn phát (P_{TX}), khoảng cách truyền dẫn (d). Trong [9], các tác giả có đề cập đến việc so sánh DRoF và ARoF khi thay đổi P_{TX} và d nhưng mới chỉ thực hiện bằng phần mềm mô phỏng Optisystem chứ chưa so sánh dựa các biểu thức toán học của BER và SNR của 2 hệ thống. Ngoài ra, bài báo mới chỉ khảo sát các hệ thống có máy thu tách sóng trực tiếp (DD: Direct Detection) chứ chưa đề cập đến máy thu tách sóng kết hợp (CD: Coherent Detection) trong đó có sử dụng Laser dao động nội ở máy thu với công suất P_{LO} để tăng độ nhạy cho hệ thống. Trong [10], các tác giả tiến hành các thực nghiệm so sánh hệ thống ARoF và SDRoF điều chế 16QAM với tốc độ từ 25 Mbaud đến 125Mbaud, tần số trung tâm 1 GHz. Qua đó đã chứng tỏ tính hiệu quả của kỹ thuật điều chế SdoF so với ARoF. Tuy nhiên, bài báo theo hướng nghiên cứu thực nghiệm trên sợi quang đa mode OM4 với $d=200$ m, sử dụng bước sóng ánh sáng 850 nm (có tổn hao công suất lớn) cho các hệ thống truyền dẫn ngắn. Trong [11], tuy các tác giả đã đề cập đến các hệ thống ARoF và DRoF với loại máy thu tách sóng trực tiếp và tách sóng kết hợp khác nhau nhưng chủ yếu tập trung nghiên cứu hệ thống đồng tần

(Homodyne), kết quả so sánh các hệ thống được thể hiện dưới dạng bảng so sánh các đặc điểm chung về băng thông, độ nhạy, tính phức tạp giữa các hệ thống...

Bài báo tiến hành khảo sát và so sánh đánh giá đặc tính SNR, BER của các hệ thống ARoF và DRoF cho cả 2 phương pháp tách sóng trực tiếp và tách sóng kết hợp. Trong phương pháp tách sóng kết hợp, bài báo cũng tiến hành so sánh, đánh giá các kiểu điều chế và tách sóng khác nhau như ASK, FSK, PSK đổi tần đồng bộ, không đồng bộ và đồng tần với nhiều kịch bản thay đổi P_{TX} , d và P_{LO} . Phần 2 của bài báo khảo sát mô hình tính toán, SNR và BER. Phần 3 sử dụng công cụ để tính toán mô phỏng, từ đó tiến hành đánh giá và thảo luận.

2. Mô hình tính toán và tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR)

Sơ đồ khối của 2 hệ thống ARoF và DRoF được trình bày tương ứng trong hình 1a và 1b, trong đó hệ thống DRoF (1b), tín hiệu vô tuyến được số hóa trước khi tiến hành điều chế vào sóng ánh sáng để truyền trong sợi quang.

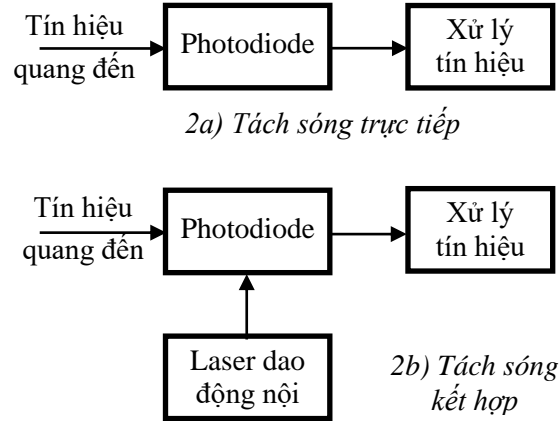


Hình 1. Hệ thống RoF tương tự (1a) và hệ thống RoF số (1b) [9]

Trong mỗi hệ thống ARoF và DRoF còn được phân loại thành hệ thống tách sóng trực tiếp (DD-Direct Detection) và hệ thống tách sóng kết hợp (CD-Coherent Detection).

Hình 2a trình bày nguyên lý tách sóng trực tiếp, trong đó sóng ánh sáng đến được tách sóng trực tiếp nhờ photodiode để chuyển đổi tín hiệu sang miền điện và đưa vào khối xử lý

tín hiệu để khôi phục lại tín hiệu RoF ban đầu. Hình 2b biểu diễn nguyên lý tách sóng kết hợp, trong đó sóng ánh sáng đến phối hợp với sóng ánh sáng của Laser dao động nội của máy thu trước khi được photodiode tách sóng.



Hình 2. Nguyên lý tách sóng trực tiếp (2a) và tách sóng kết hợp (2b)

Hiệu năng của hệ thống ARoF và DRoF được thể hiện bằng tỉ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu (SNR) và tỉ lệ lỗi bit (BER) nhận được tại máy thu.

Khác với hệ thống ARoF, hệ thống DRoF thực hiện quá trình chuyển đổi tín hiệu tương tự - số (ADC và DAC) làm phát sinh các loại nhiễu trội tác động vào tín hiệu [13], [14] bao gồm nhiễu do bộ lọc băng thông trước khi lấy mẫu, nhiễu do chong phổ, nhiễu do lượng tử hóa của bộ ADC, nhiễu trượt (jitter) của bộ ADC và DAC và nhiễu trong bộ tách sóng. Các loại nhiễu này ảnh hưởng đến tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu tổng SNR của hệ thống như sau:

+ SNR của hệ thống ARoF và DRoF sử dụng kỹ thuật tách sóng trực tiếp (DD) được biểu diễn theo các SNR thành phần [13], [14]

$$SNR_{ARoF_DD}^{-1} = SNR_{IM}^{-1} + SNR_{DD}^{-1} \tag{1}$$

$$SNR_{DRoF_DD}^{-1} = SNR_F^{-1} + SNR_A^{-1} + SNR_Q^{-1} + SNR_{J-ADC}^{-1} + SNR_{J-DAC}^{-1} + SNR_{DD}^{-1} \tag{2}$$

Trong đó, SNR_{IM} , SNR_{DD} lần lượt là SNR do ảnh hưởng của nhiễu xuyên điều chế và SNR của bộ tách sóng trực tiếp. SNR_F , SNR_A , SNR_Q , SNR_{J-ADC} , SNR_{J-DAC} lần lượt là SNR do ảnh hưởng của bộ lọc băng thông, chong phổ,

lượng tử hóa, do ảnh hưởng trượt của bộ chuyển đổi ADC và DAC.

+ SNR của hệ thống ARoF và DRoF sử dụng kỹ thuật tách sóng kết hợp (CD) bao gồm các SNR thành phần và được trình bày theo biểu thức [13], [15].

$$SNR_{ARoF_CD}^{-1} = SNR_{IM}^{-1} + SNR_{CD}^{-1} \quad (3)$$

$$SNR_{DRoF_CD}^{-1} = SNR_F^{-1} + SNR_A^{-1} + SNR_{J-ADC}^{-1} + SNR_Q^{-1} + SNR_{CD}^{-1} + SNR_{J-DAC}^{-1} \quad (4)$$

Trong đó, SNR_{CD} là SNR của bộ tách sóng kết hợp. Các SNR thành phần được trình bày lần lượt như sau:

+ SNR của bộ tách sóng trực tiếp (DD) được xác định như biểu thức [16], [17], [18].

$$SNR_{DD} = \frac{S_{DD}}{N_Q + N_D + N_{TH}} = \frac{R^2 P_S^2 R_L}{2qB_e R P_S R_L + 2qB_e (I_{DB} + I_{DS}) R_L + 4KTB_e} \quad (5)$$

Với S_{DD} , N_Q , N_D , N_{TH} lần lượt là công suất tín hiệu điện trên điện trở tải R_L , công suất nhiễu lượng tử, nhiễu dòng tối và nhiễu nhiệt. P_S là công suất tín hiệu quang đến đầu vào máy thu; R , R_L lần lượt là hệ số chuyển đổi quang - điện và điện trở tải của photodiode; q , K , T lần lượt là điện tích electron, hằng số Boltzmann và nhiệt độ tuyệt đối; I_{DB} và I_{DS} : là dòng tối khối và dòng tối bề mặt của photodiode; B_e : băng thông điện của máy thu.

+ SNR của bộ tách sóng kết hợp (CD) được biểu diễn theo biểu thức [16], [17], [18].

$$SNR_{CD} = \frac{S_{CD}}{N_Q + N_D + N_{TH}} = \frac{R^2 P_S P_{LO} R_L}{2qB_e R (P_S + P_{LO}) R_L + 2qB_e (I_{DB} + I_{DS}) R_L + 4KTB_e} \quad (6)$$

Với S_{CD} là công suất tín hiệu điện trên điện trở tải R_L , P_{LO} là công suất quang của Laser dao động nội. Biểu thức (6) tương ứng với trường hợp đã sử dụng vòng khóa pha OPLL và vòng khóa phân cực để đồng bộ sóng quang đến bộ tách sóng và sóng quang của Laser dao động nội.

+ Trong hệ thống ARoF, các sóng mang vô tuyến của các kênh khác nhau tác động vào

sóng mang vô tuyến của kênh đang khảo sát tạo ra nhiễu xuyên điều chế. SNR do ảnh hưởng của nhiễu xuyên điều chế được xác định theo biểu thức [13], [14].

$$SNR_{IM} (dB) = 2IP - 2P_{in} \quad (7)$$

Trong đó, IP là điểm chặn (Intercept Point)

P_{in} là công suất sóng mang vô tuyến.

+ SNR_F do ảnh hưởng của bộ lọc băng thông được trình bày như sau [13]

$$SNR_F = \frac{P_{sig}}{P_{Nth}} = \frac{P_{sig}}{N_0 B} \quad (8)$$

Với B , P_{sig} lần lượt là băng thông bộ lọc và công suất tín hiệu vào bộ lọc, N_0 là mật độ phổ công suất của nhiễu.

+ Do tác động của nhiễu chồng phổ, SNR_A tại bộ lấy mẫu được biểu diễn như sau

$$SNR_A = \frac{P_{sig}}{(m-1)P_{Nth}} = \frac{P_{sig}}{(m-1)N_0 B} \quad (9)$$

Trong đó: $m = \frac{B_{eff}}{B}$ với B_{eff} là băng thông hiệu dụng của bộ lấy mẫu.

+ SNR_{J-ADC} tại bộ ADC bị ảnh hưởng nhiễu do trượt (Jitter) trong quá trình chuyển đổi AD.

$$SNR_J = \frac{P_{sig}}{2\pi^2 f^2 \sigma_\tau^2 A^2} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 \sigma_\tau^2} \quad (10)$$

Với σ_τ là độ trượt (jitter) của xung clock, A và f lần lượt là biên độ và tần số tín hiệu vào hình sine.

+ SNR_Q tại bộ ADC do tác động nhiễu lượng tử, được xác định như sau:

$$SNR_Q = 20 \lg \left[\left(\frac{\sqrt{M} + 1}{3\sqrt{M} - 3} \right)^{-0.5} \sqrt{32^Q} \right] \text{ [dB]} \quad (11)$$

$$= 6.02Q + 10 \lg \left(\frac{\sqrt{M} + 1}{\sqrt{M} - 1} \right)$$

Trong đó, Q là số bit của từ mã hóa tín hiệu vô tuyến (RF), M là số trạng thái điều chế.

+ SNR_{J-DAC} tại bộ DAC bị ảnh hưởng nhiễu do trượt trong quá trình chuyển đổi DAC.

$$SNR_{J-DAC} = (1 + 2f/f_s)(4\sigma_\tau^2 f_s^2 \sin^2(\pi f/f_s)) \quad (12)$$

Với f_s là tần số lấy mẫu tín hiệu.

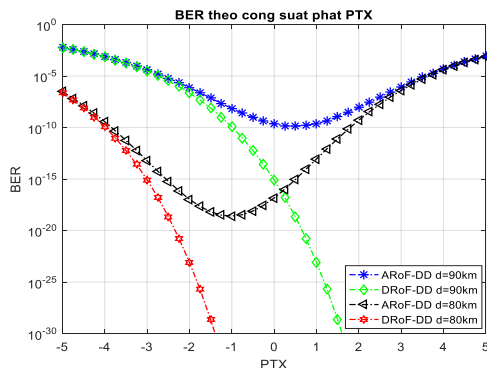
Hệ thống ARoF và DRoF dùng kỹ thuật tách sóng trực tiếp chỉ sử dụng một phương pháp điều chế - giải điều chế ASK. Trong khi đó, hệ thống ARoF và DRoF tách sóng kết hợp thì sử dụng nhiều phương pháp điều chế - giải điều chế: ASK, FSK, PSK, trong đó có đôi tần đồng bộ, đôi tần không đồng bộ và đồng tần. Mối quan hệ giữa SNR tổng trong các biểu thức (1) đến (4) và BER của các hệ thống ARoF và DRoF theo các phương pháp giải điều chế được biểu diễn như sau [16], [17], [18].

Bảng 1. Các thông số của hệ thống khảo sát

| Các thông số của hệ thống | | |
|---------------------------|--|----------------------------|
| R | Hệ số chuyển đổi quang điện | 0,8 A/W |
| R_L | Điện trở tải của photodiode | 50 Ω |
| T | Nhiệt độ tại máy thu | 300°K |
| I_{DB} | Dòng tối khối | 100 x 10 ⁻¹² A |
| I_{DS} | Dòng tối bề mặt [A] | 100 x 10 ⁻¹² A |
| B | Băng thông bộ lọc ADC | 1 x 10 ⁻⁹ Hz |
| B_e | Băng thông của máy thu | 0,75 x 10 ⁹ Hz |
| σ_z | Độ trượt của bộ ADC và DAC | 0,3 x 10 ⁻¹² Hz |
| f | Tần số sóng vô tuyến RF | 2 x 10 ⁹ Hz |
| f_s | Tần số lấy mẫu tín hiệu RF của bộ ADC | 2,5 x 10 ⁹ Hz |
| α | Suy hao trên 1km sợi quang (kể cả suy hao các mối hàn) | 0,25 dB/km |
| λ | Bước sóng quang | 1550 nm |
| m | $m = B_{eff}/B$ | 2 |
| IP | Điểm chặn (Intercept point) | 12 - 20 |
| P_{TX} | Công suất của nguồn phát quang | -5dBm- +5dBm |
| P_{LO} | Công suất quang của bộ dao động nội | -5dBm- +5dBm |

3. Kết quả và thảo luận

3.1. So sánh BER của hai hệ thống ARoF và DRoF tách sóng trực tiếp (DD) theo công suất phát P_{TX}



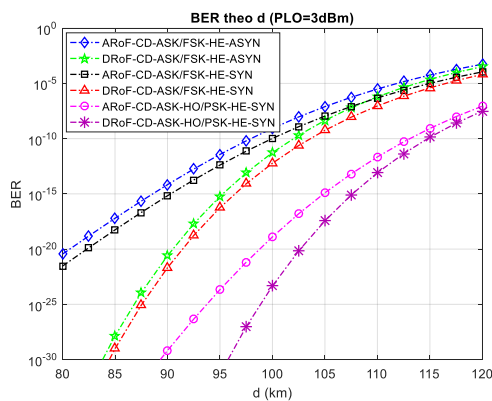
Hình 3. Quan hệ BER và P_{TX} của 2 hệ thống ARoF và DRoF tách sóng trực tiếp với $d = 80$ km và $d=90$ km

Hình 3 biểu diễn mối quan hệ giữa BER và công suất nguồn phát quang P_{TX} của hai hệ thống ARoF và DRoF sử dụng phương pháp tách sóng trực tiếp với khoảng cách truyền lần lượt là $d = 80$ km và $d = 90$ km. Để tiện việc phân tích, bài báo so sánh BER tương ứng với trường hợp $d = 90$ km trước. Từ đồ thị ta thấy, khi công suất của nguồn phát quang P_{TX} còn nhỏ ($P_{TX} < -2$ dBm) thì BER của 2 hệ thống ARoF và DRoF gần như trùng nhau, khả năng cải thiện BER của DRoF không đáng kể so với ARoF. Tuy nhiên, khi P_{TX} tăng lên thì BER của DRoF giảm xuống rất nhanh trong khi BER của ARoF giảm xuống chậm hơn và đạt giá trị thấp nhất ($BER \approx 10^{-9}$) tương ứng với $P_{TX} \approx 0,5$ dBm. Sau đó khi P_{TX} càng tăng thì BER của DRoF tiếp tục càng giảm nhưng BER của ARoF thì tăng lên lại (sau khi đạt cực tiểu) làm cho 2 đặc tuyến ngày càng cách xa nhau. Đáng chú ý BER của ARoF giảm sau đó lại tăng lên được giải thích như sau: khi công suất phát quang P_{TX} đưa vào sợi quang còn nhỏ ($P_{TX} < -2$ dBm), thì công suất nhiễu xuyên điều chế do các sóng mang vô tuyến khác tác động vào sóng mang vô tuyến của kênh đang khảo sát còn bé nên SNR_{IM} lớn, do đó theo biểu thức (1) thì SNR_{ARoF_DD} của hệ thống ARoF phụ thuộc chủ yếu vào SNR_{DD} của bộ tách sóng. Mà theo biểu thức (5) SNR_{DD} tăng lên khi P_{TX} tăng (làm P_S tăng), điều này làm BER của ARoF giảm và đạt được giá trị cực tiểu tại $P_{TX} \approx 0,5$ dBm. Tuy nhiên, khi P_{TX} tăng lớn hơn 0,5 dBm thì công suất nhiễu xuyên điều chế tăng lên làm SNR_{IM} giảm dẫn đến SNR_{ARoF_DD} giảm làm cho BER tăng lên. Trái lại, trong hệ thống DRoF vì tần số sóng vô tuyến mang thông tin đã được số hóa trước khi đưa vào điều chế ánh sáng nên hiện tượng nhiễu xuyên điều chế rất nhỏ, không gây ảnh hưởng nhiều đến SNR_{DRoF_DD} của hệ thống, do đó khi P_{TX} càng tăng lên thì SNR_{DRoF_DD} càng tăng làm BER càng giảm và khoảng chênh lệch của BER giữa 2 hệ thống càng trở nên đáng kể. Cụ thể, khi $P_{TX} = 0$ dBm, ARoF có $BER \approx 10^{-10}$ thì BER của DRoF giảm xuống thành $BER \approx 10^{-15}$. Khi $P_{TX} = 1$ dBm thì BER của 2 hệ thống này càng chênh lệch nhau nhiều hơn, cụ thể: $BER \approx 10^{-10}$ đối với ARoF và $BER \approx 10^{-23}$ đối với DRoF. Điều này chứng tỏ

khi tăng công suất quang P_{TX} đưa vào sợi quang thì hệ thống DRoF có chất lượng ngày càng tốt hơn (BER càng thấp hơn) so với ARoF.

Đồ thị hình 3 cũng cho thấy với cùng một giá trị P_{TX} , khi tăng khoảng cách truyền dẫn d từ 80 km thành 90 km thì đặc tuyến BER của cả 2 hệ thống ARoF và DRoF đều trở nên xấu hơn (giá trị BER tương ứng lớn hơn). Điều này được giải thích là lúc đó công suất tín hiệu đến đầu vào máy thu (P_S) bị suy giảm do tổn hao trên đường truyền tăng lên, trong khi đó công suất nhiễu nhiệt (chiếm phần quan trọng trong công suất nhiễu tổng) không thay đổi nên SNR_{DD} của máy thu giảm (biểu thức (5)), làm cho BER tăng lên.

3.2. So sánh BER của hai hệ thống ARoF và DRoF tách sóng trực tiếp (DD) theo khoảng cách (d)



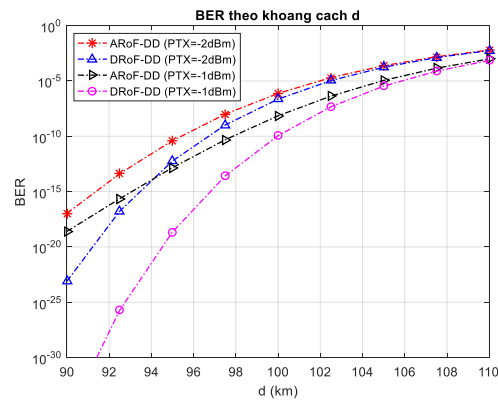
Hình 4. Quan hệ BER và d của 2 hệ thống ARoF và DRoF với $P_{TX} = -2$ dBm và $P_{TX} = -1$ dBm

Hình 4 trình bày mối quan hệ giữa đặc tuyến BER theo khoảng cách d của hai hệ thống ARoF và DRoF dùng kỹ thuật tách sóng trực tiếp tương ứng với công suất phát $P_{TX} = -2$ dBm và $P_{TX} = -1$ dBm. Từ đồ thị ta thấy rằng, với cùng một giá trị của d thì BER của DRoF nhỏ hơn (tốt hơn) BER của ARoF. Điều này là do việc số hóa tín hiệu sóng vô tuyến trước khi điều chế ánh sáng đưa vào sợi quang trong hệ thống DRoF làm $SNR_{DRoF-DD}$ (biểu thức (2)) không có thành phần SNR_{IM} nên $SNR_{DRoF-DD} > SNR_{ARoF-DD}$, nghĩa là BER của DRoF nhỏ hơn ARoF.

Khi tăng công suất phát (từ $P_{TX} = -2$ dBm lên thành $P_{TX} = -1$ dBm) thì BER của cả 2 hệ thống ARoF và DRoF đều tốt hơn. Điều này

được giải thích là do khi tăng công suất tại máy phát (P_{TX}) thì công suất tại đầu vào máy thu P_S cũng tăng lên. Lúc đó, dựa vào biểu thức (5) tính SNR_{DD} của máy thu DD ta thấy từ số của SNR_{DD} tỉ lệ với bình phương P_S còn mẫu số chỉ tỉ lệ với P_S mà thôi. Do đó SNR_{DD} tăng dẫn đến SNR tổng của 2 hệ thống tăng, làm đặc tuyến BER của chúng giảm xuống (chất lượng hệ thống tăng lên) khi ta tăng công suất phát P_{TX} từ -2 dBm thành -1 dBm.

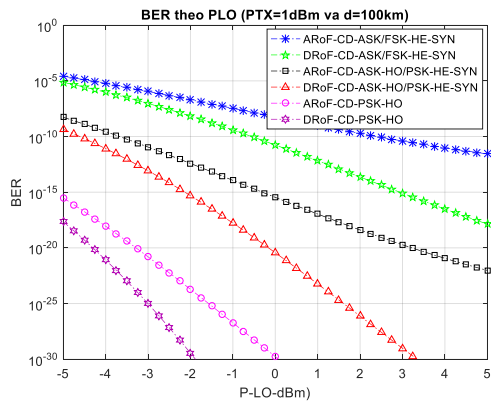
3.3. So sánh BER của hai hệ thống ARoF và DRoF theo khoảng cách d (máy thu tách sóng kết hợp (CD))



Hình 5. Quan hệ BER và d dùng kỹ thuật ASK, FSK, PSK đối tần đồng bộ, không đồng bộ và ASK đồng tần

Hình 5 trình bày đặc tuyến BER theo khoảng cách d của hai hệ thống ARoF và DRoF tách sóng kết hợp (CD) dùng kỹ thuật giải điều chế ASK, FSK, PSK đối tần đồng bộ, không đồng bộ và ASK đồng tần với công suất quang bộ dao động nội $P_{LO} = 3$ dBm. Trong tất cả các kỹ thuật giải điều chế, cả hai hệ thống đều có $BER < 10^{-9}$ khi $d < 100$ km. Khi d từ 105 km đến 115 km thì chỉ có kỹ thuật giải điều chế ASK đồng tần và PSK đối tần đồng bộ của cả hai hệ thống là vẫn đáp ứng được yêu cầu $BER < 10^{-9}$. Trong từng phương pháp giải điều chế, hệ thống DRoF đều có đường đặc tuyến BER tốt hơn so với hệ thống ARoF, lý do cũng được giải thích là hệ thống DRoF truyền dẫn tín hiệu RF đã được số hóa nên không bị nhiễu xuyên điều chế như trong hệ thống ARoF.

3.4. So sánh BER của hai hệ thống ARoF và DRoF theo công suất dao động nội P_{LO}



Hình 6. Quan hệ BER và P_{LO} sử dụng kỹ thuật ASK, FSK đôi tần đồng bộ, PSK đôi tần đồng bộ và ASK, PSK đồng tần

Hình 6 trình bày mối quan hệ giữa BER và công suất dao động nội P_{LO} của hai hệ thống ARoF và DRoF sử dụng kỹ thuật ASK, FSK đôi tần đồng bộ, PSK đôi tần đồng bộ và ASK, PSK đồng tần tương ứng với $P_{TX} = 1\text{dBm}$ và $d = 100\text{ km}$. Từ đồ thị ta thấy, khi tăng P_{LO} thì các đường đặc tuyến BER đều giảm làm chất lượng tín hiệu thu tăng lên. Điều này được giải thích dựa vào biểu thức (6) tính SNR_{CD} . Khi tăng P_{LO} từ -5 dBm đến $+5\text{ dBm}$ thì công suất tín hiệu tăng nhanh hơn công suất nhiễu làm cho SNR_{CD} tăng dẫn đến SNR tổng của 2 hệ thống là SNR_{ARoF_CD} và SNR_{DRoF_CD} trong các biểu thức (3) và (4) tăng. Điều này làm BER của cả 2 hệ thống đều giảm. Các kết quả trong hình cũng cho thấy, trong cùng một phương pháp giải điều chế và cùng các thông số đầu vào, thì đặc tuyến BER hệ thống DRoF luôn nằm phía dưới (BER tốt hơn) so với hệ thống ARoF. Lý do cũng được giải thích là hệ thống DRoF truyền dẫn tín hiệu RF đã được số hóa nên không bị nhiễu tích lũy như hệ thống ARoF.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày mô hình tiêu biểu của 2 hệ thống truyền dẫn tín hiệu vô tuyến qua sợi quang tương tự (ARoF) và số (DRoF) với khoảng cách truyền dẫn $\leq 120\text{ km}$; trình bày tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR) tổng từ các SNR thành phần và tỉ lệ lỗi bit (BER) trong 2 hệ thống ARoF và DRoF. Từ đó, bài báo đã sử dụng Matlab để vẽ các đồ thị và so

sánh hiệu năng của 2 hệ thống ARoF và DRoF tách sóng trực tiếp và kết hợp sử dụng các phương pháp giải điều chế khác nhau. Việc so sánh đã được tiến hành theo nhiều trường hợp khác nhau như thay đổi công suất nguồn phát quang, khoảng cách truyền dẫn, công suất Laser dao động nội. Kết quả so sánh cho thấy với cùng giá trị của các thông số hệ thống thì hiệu năng (BER) của DRoF tốt hơn so với ARoF. Khả năng cải thiện hiệu năng này càng tăng khi tăng P_{TX} hoặc P_{LO} . Từ các đồ thị biểu diễn hiệu năng của 2 hệ thống ARoF và DRoF, bài báo đã xác định được một cách định lượng mức độ cải thiện BER của hệ thống DRoF so với ARoF tương ứng với 2 kỹ thuật tách sóng khác nhau và với các phương pháp điều chế khác nhau theo các giá trị cụ thể của công suất nguồn phát quang, khoảng cách truyền dẫn cũng như công suất Laser dao động nội.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. Cisco System Inc., "Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022," *White Paper*, 26/11/2018.
- [2]. Ericsson, "Mobile data traffic outlook, Mobility report – Ericsson," 2019. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2019/mobile-data-traffic-outlook>. [Accessed May 2, 2020].
- [3]. D. Apostolopoulos, G. Giannoulis, N. Argyris, N. Iliadis, K. Kanta, and H. Avramopoulos, "Analog radio-over-fiber solutions in support of 5G," 2018 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2018, pp. 266-271, doi:10.23919/ondm.2018.8396143.
- [4]. G. K. Chang, and C. Liu, "1–100GHz microwave photonics link technologies for next-generation WiFi and 5G wireless communications," 2013 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), Oct. 2013, pp. 28-31, INSPEC Accession Number: 14060789.
- [5]. T. S. Rappaport et al., "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It Will Work," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349, 2013.
- [6]. D. Novak et al., "Radio-Over-Fiber Technologies for Emerging Wireless

- Systems," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2016.
- [7]. P. Rost et al., "Mobile network architecture evolution toward 5G," *IEEE Communication Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 84-91, 2016.
- [8]. B. R. Ballal, and S. Nema, "Performance Comparison of Analog and Digital Radio Over Fiber Link," *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSSET)*, vol. 3, no. 6, pp. 193-198, June 2012.
- [9]. G. Aarthi, and N. Sangeetha, "Comparative Analysis of Analog and Digitized Radio-over-Fiber Systems," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology (IJESRT)*, vol. 3, no. 2, pp. 862-866, February 2014.
- [10]. L. Breyne et al., "Comparison between Analog Radio-over-Fiber and Sigma Delta Modulated Radio-over-Fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 21, pp. 1808-1811, Nov. 2017.
- [11]. B. Schrenk, "The EML as Analogue Radio-over-Fiber Transceiver - a Coherent Homodyne Approach," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 12, pp. 2866-2872, 2019.
- [12]. H. D. Jung et al., "Performance comparison analog and digitized rof system with nonlinear channel condition," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 6, pp. 661-664, Mar. 2016.
- [13]. Y. (Veronica) Yang, "Investigation on Digitized RF transport over Fiber," Doctor of Philosophy Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Melbourne, Australia, March 2011.
- [14]. P. A. Gamage et al., "Design and Analysis of Digitized RF-Over-Fiber Links," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no.12, pp. 2052-2061, June 15, 2009.
- [15]. G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York, fourth Edition, 2010.
- [16]. S. Shimada, *Coherent Lightwave Communications Technology*. Springer Netherlands, ISBN: 978-0-412-57940-0, 978-94-011-1308-3, 1995.
- [17]. J. M. Senior, *Optical fiber communications: principles and practice*. Third Edition, Prentice Hall, Inc., 2009.
- [18]. R. E. Watson, "Receiver Dynamic Range: Part 1," *Watkins-Johnson Company, Tech-Notes*, vol. 14, no. 1, pp. 1-12, January/February 1987.