

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

---



**BẠCH THANH TÙNG**

**ẢNH HƯỞNG PHI TUYẾN CỦA TRUYỀN DẪN SÓNG VÔ TUYẾN  
QUA SỢI QUANG TRONG HỆ THỐNG 5G**

**Chuyên ngành: KỸ THUẬT VIỄN THÔNG**

**Mã số: 08-52-02-08**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT**

**(Theo định hướng ứng dụng)**

**NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. NGUYỄN ĐỨC NHÂN**

**HÀ NỘI - 2020**

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

*Tác giả luận văn*

**BẠCH THANH TÙNG**

# MỤC LỤC

<b>LỜI CAM ĐOAN .....</b>	<b>I</b>
<b>MỤC LỤC .....</b>	<b>I</b>
<b>DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT .....</b>	<b>III</b>
<b>DANH MỤC CÁC BẢNG.....</b>	<b>VI</b>
<b>DANH MỤC CÁC HÌNH .....</b>	<b>VII</b>
<b>MỞ ĐẦU.....</b>	<b>VIII</b>
<b>CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VÀ ỨNG DỤNG CỦA KỸ THUẬT TRUYỀN SÓNG VÔ TUYẾN QUA SỢI QUANG (ROF).....</b>	<b>1</b>
1.1. Giới thiệu.....	1
1.2. Khái niệm truyền sóng vô tuyến qua sợi quang.....	2
1.3. Các thành phần cơ bản của tuyến quang sử dụng RoF .....	3
1.4. Các kỹ thuật sử dụng trong RoF .....	4
1.4.1. Công nghệ RoF sử dụng kỹ thuật IM-DD .....	5
1.4.2. Công nghệ RoF sử dụng kỹ thuật tách heterodyne đầu xa RHD .....	5
1.4.3. Nhiễu .....	8
1.4.4. Nhận xét.....	9
1.5. Đặc điểm của hệ thống RoF .....	10
1.5.1. Những ưu điểm của công nghệ RoF.....	10
1.5.2. Hạn chế của công nghệ RoF.....	11
1.6. Ứng dụng của truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF).....	12
1.6.1. Ứng dụng RoF trong Wireless LAN băng tần 60GHz.....	12
1.6.2. RoF ứng dụng trong mạng thông tin giao thông.....	15
1.6.3. RoF ứng dụng trong mạng 5G .....	20
1.7. Kết luận chương 1 .....	24
<b>CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG PHI TUYẾN TRONG ROF.....</b>	<b>25</b>
2.1. Giới thiệu.....	25
2.2. Các tham số bộ thu phát .....	25
2.3. Các tham số của kênh quang.....	27

2.4.	Các tham số kênh vô tuyến.....	31
2.5.	Hiệu ứng phi tuyến sợi quang.....	34
2.6.	Kết luận chương 2 .....	43
<b>CHƯƠNG 3: ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG PHI TUYẾN CỦA TRUYỀN DẪN SÓNG VÔ TUYẾN QUA SỢI QUANG TRONG HỆ THỐNG 5G .....</b>		<b>44</b>
3.1	. Giới thiệu.....	44
3.2.	Đặc điểm hệ thống .....	45
3.3.	Mô hình khảo sát RoF ứng dụng trong mạng 5G .....	47
3.2.1.	Liên kết vô tuyến.....	47
3.2.2.	Liên kết ROF.....	49
3.4.	Kết quả thực hiện đánh giá khảo sát .....	50
3.4.1.	Phân tích đánh giá hiệu ứng nhiễu phi tuyến .....	50
3.4.2.	Thiết kế Bộ thu.....	54
3.4.3.	Kết quả thực hiện .....	61
3.5.	Kết luận chương 3 .....	63
<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....</b>		<b>64</b>
<b>DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>		<b>65</b>

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

STT	Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
1.	3G	Third-Generation Technology	Công nghệ truyền thông thế hệ thứ 3
2.	AP	Access Point	Điểm truy cập
3.	ASK	Amplitude Shift Keying	Điều chế khóa dịch biên
4.	BB	Access Point	Băng tần cơ sở
5.	BER	Bit Error Rate	Tỷ số lỗi bit
6.	BPSK	Binary Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha hai trạng thái
7.	BS	Base Station	Trạm gốc
8.	BWAN	Broadband Wireless Access Network	Mạng truy nhập vô tuyến băng rộng
9.	CDMA	Code Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo mã
10.	CS	Central Station	Trạm trung tâm
11.	DFB	Distributed Feedback Laser	Laser phản hồi phân bố
12.	DMOD	Demodulator	Bộ giải điều chế
13.	DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh theo bước sóng mật độ cao
14.	EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Bộ khuếch đại sợi quang pha tạp Erbium
15.	EOM	Extenal Optical Modulator	Bộ điều chế quang mở rộng
16.	FDD	Frequency Division Duplexing	Song công phân chia theo tần số
17.	FS	Frequency Switch	Chuyển mạch tần số
18.	FSK	Frequency Shift Keying	Điều chế khóa dịch tần
19.	IB-DFE	Iterative Block Decision Feedback Equalization	Cân bằng phản hồi quyết định lặp khối
20.	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Viện kỹ sư điện và điện tử
21.	IF	Intermediate Frequency	Tần số trung tần
22.	IM-DD	Insensity Modulation – Direct	Điều chế cường độ - tách sóng trực

		Detector	tiếp
23.	ITS	Intelligent Transportation System	Hệ thống vận tải thông minh
24.	LD	Laser Diode	Bộ phát laser
25.	LMDS	Local Multipoint Distribution Service	Dịch vụ phân phối đa điểm cục bộ
26.	LO	Local Oscillator	Bộ dao động nội
27.	MAC	Medium Access Control	Điều khiển truy nhập môi trường
28.	MH	Mobile Host	Trạm di động
29.	MOD	Modulator	Bộ điều chế
30.	MZM	Match-Zehnder Modulator	Bộ điều chế Match-Zehnder
31.	OADM	Optical Add/Drop Multiplexer	Bộ xen rẽ sóng quang
32.	OSSBC	Optical Single-Side-Band Modulation	Điều chế quang đơn biên
33.	PD	Photo Diode	Bộ tách sóng
34.	PMD	Polarization – Mode Dispersion	Hiện tượng tán sắc phân cực mode
35.	PSK	Phase Shift Keying	Điều chế khóa dịch pha
36.	PSTN	Public Switching Telephone Network	Mạng chuyển mạch điện thoại công cộng
37.	QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
38.	RAU	Remote Antena Unit	Trạm ăng-ten đầu xa
39.	RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
40.	RHD	Remote Heterodyne Detector	Tách sóng Heterodyne đầu xa
41.	RoF	Radio over Fiber	Sóng vô tuyến qua sợi quang
42.	RTT	Round-Trip Time	Thời gian tín hiệu đi một vòng
43.	RVC	Road Vehicle Communication	Mạng truyền thông của các phương tiện giao thông trên đường
44.	SCM	SubCarrier Multiplexing	Kết hợp sóng mang con
45.	SNR	Signal Noise Rate	Tỷ số tín hiệu trên nhiễu

46.	SS	Subscriber Station	Trạm thuê bao
47.	TDMA	Time Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo thời gian
48.	TDMA/ TDD	Time Division Multiple Access/ Time Division Duplexing	Đa truy nhập phân chia theo thời gian/ song công phân chia thời gian
49.	TRX	Transceiver	Bộ thu phát
50.	TT-TR	Tunable Transmitter – Tunable Receiver	Máy phát có thể điều chỉnh – máy thu có thể điều chỉnh
51.	VCZ	Virtual Cellular Zone	Vùng mạng tế bào ảo
52.	WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo mã băng rộng
53.	WLAN	Wireless Local Areal Network	Mạng vô tuyến cục bộ

## DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2. 1.Hệ số suy hao do mưa.....	33
Bảng 2. 2. So sánh hiệu ứng khúc xạ phi tuyến. ....	43



## DANH MỤC CÁC HÌNH

Hình 1. 1. Khái niệm về hệ thống RoF .....	2
Hình 1. 2. Hệ thống quang-vô tuyến 900 MHz .....	3
Hình 1. 3. Các thành phần cơ bản trong kiến trúc RoF.....	4
Hình 1. 4. Tạo tín hiệu RF bằng điều chế cường độ .....	5
Hình 1. 5. Sơ đồ khối kỹ thuật tách sóng heterodyne .....	6
Hình 1. 6. Nguyên lý trộn kết hợp (coherent) quang dựa trên laser điều tần .....	8
Hình 1. 7. Kiến trúc mạng RoF cho WLAN.....	13
Hình 1. 8. Độ trễ chuyển giao trong giao thức chuyển giao bàn cờ .....	14
Hình 1. 9. Mạng RVC dựa trên kỹ thuật RoF.....	18
Hình 1. 10. Kiến trúc mạng RVC dựa trên kỹ thuật RoF. ....	18
Hình 1. 11. Ấn định khung trong khi di chuyển. ....	19
Hình 1. 12. Kiến trúc RoF cho mạng truyền tải 5G .....	22
Hình 1. 13. Liên kết PM-DD và IM-DD (a) độ lợi và (b) công suất nhiễu. <sup>[5]</sup> .....	22
Hình 1. 14. Dải động của liên kết (a) IM-DD và (b) PM-DD ( $\tau = 100$ ps) với $f_{RF} = 5$ GHz. <sup>[5]</sup> .....	23
Hình 1. 15. Sơ đồ điều chế/giải điều chế F-OFDM.....	24
Hình 2. 1. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống MMW-RoF .....	25
Hình 2. 2. Hệ thống IM-DD .....	29
Hình 2. 3. Nguyên lý của hệ thống MMW-RoF sử dụng tách sóng tạo phách từ xa .....	30
Hình 2. 4. Sự phụ thuộc của chiết suất sợi silic vào công suất quang.....	35
Hình 2. 5. Hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang.....	36
Hình 2. 6. Hiện tượng mở rộng phổ của xung do SPM.....	37
Hình 2. 7. Hiệu ứng với các mức khoảng cách khác nhau theo khoảng cách kênh .....	40
Hình 2. 8. Sự tăng ánh sáng tán xạ ngược khi công suất quang tăng .....	42
Hình 3. 1. Sơ đồ hệ thống RoF sóng milimet điển hình.....	46
Hình 3. 2. Biểu diễn kiến trúc của hệ thống OFDM MMW-RoF. CS, BS, OF, OC, MZM, PA, LNA, MPA và BPF bao gồm site trung tâm, trạm gốc, cáp quang, bộ ghép quang, bộ điều chế Mach-Zehnder, bộ khuếch đại công suất, bộ khuếch đại nhiễu thấp, bộ khuếch đại công suất trung bình và bộ lọc thông dải.....	46
Hình 3. 3. Minh họa mô hình hệ thống vô tuyến BS cộng tác .....	47
Hình 3. 4. PSD của tín hiệu bị méo phi tuyến $z(r)$ có $AM\sigma_y = 3.0$ với một kênh. <sup>[6]</sup> .....	52
Hình 3. 5. PSD của tín hiệu bị méo phi tuyến $d(r)$ có $AM\sigma_y = 3.0$ với một kênh. <sup>[6]</sup> .....	53
Hình 3. 6. Sự thay đổi của $SNRTOT$ trung bình xem xét với các giá trị khác nhau của $KRoF$ . <sup>[6]</sup> .....	54
Hình 3. 7. Sơ đồ khối máy thu đa người dùng IB-DFE. ....	60
Hình 3. 8. Hiệu suất BER đối với BS cộng tác với $P = 2$ MT, $R = 2$ BS, $KRoF = 20$ và $AM = 4$ . <sup>[6]</sup> .....	62
Hình 3. 9. Hiệu suất BER của BS cộng tác với $P = 2$ MT, $R = 2$ BS và các giá trị khác nhau của $KRoFp = 1$ . <sup>[6]</sup> .....	62
Hình 3. 10. Hiệu suất BER của BS cộng tác với $P = 2$ MT, $R = 2$ BS và các giá trị khác nhau của $KRoFp = 2$ . <sup>[6]</sup> .....	63

## MỞ ĐẦU

Mạng di động thế hệ tiếp theo, thế hệ thứ năm (5G), sẽ đáp ứng nhu cầu phát triển các dịch vụ truy cập không dây băng rộng tốc độ cao. Một trong những giải pháp sử dụng cho mạng 5G là công nghệ truyền dẫn RoF tốc độ cao tại tần số hàng chục GHz. Do vậy, có nhiều yếu tố giới hạn hệ thống cần được xem xét trong đó có phi tuyến. Các méo phi tuyến xảy ra trong hệ thống gây ra từ nhiều thành phần gồm phần tử chuyển đổi điện – quang ở bộ phát, sợi quang và phần tử chuyển đổi quang – điện ở bộ thu. Khi hệ thống hoạt động ở tốc độ cao và băng tần hàng chục GHz trong mạng 5G thì các méo phi tuyến này càng nghiêm trọng. Xuất phát từ đặc điểm ứng dụng của RoF trong hệ thống mạng di động 5G em chọn đề tài: “**Ảnh hưởng phi tuyến của truyền dẫn sóng vô tuyến qua sợi quang trong hệ thống 5G**”.

Nội dung nghiên cứu của luận văn bao gồm 3 chương:

### **Chương 1: Tổng quan và ứng dụng của kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF)**

Nội dung chương này sẽ tập trung giới thiệu về kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF), các thành phần, kỹ thuật và đặc điểm của hệ thống RoF. Ứng dụng RoF trong các lĩnh vực như: Wireless LAN tốc độ cao, RVC, mạng di động 5G...

### **Chương 2: Phân tích ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến trong RoF**

Chương này sẽ nghiên cứu các ảnh hưởng của các tham số trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến lên hiệu năng hệ thống MMW-RoF. Đặc biệt, đối với hiện tượng phi tuyến không thể bỏ qua đối với các hệ thống thông tin quang hoạt động ở tốc độ bit lớn hơn 10 Gbps.

### **Chương 3: Đánh giá ảnh hưởng phi tuyến của truyền dẫn sóng vô tuyến qua sợi quang trong hệ thống 5G**

Trong chương này, sẽ tiến hành phân tích nghiên cứu đường lên của các hệ thống Trạm gốc (BS), trong đó, mỗi Thiết bị đầu cuối di động (MT) sử dụng sơ đồ điều chế đơn sóng mang theo miền tần số (SC-FDE). Sau đó đưa ra đề xuất thiết kế các máy thu mạnh tận dụng các đặc điểm thống kê của méo phi tuyến.

Mặc dù đã rất cố gắng nhưng do hạn chế về mặt kiến thức thực tế cũng như chuyên môn nên chắc chắn bài luận văn của em vẫn không tránh khỏi những thiếu sót. Em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp quý báu của các thầy cô để bài luận văn được hoàn thiện hơn nữa.

Em xin chân thành cảm ơn!

***Học viên***

# **CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VÀ ỨNG DỤNG CỦA KỸ THUẬT TRUYỀN SÓNG VÔ TUYẾN QUA SỢI QUANG (RoF)**

Nội dung chương này sẽ tập trung giới thiệu về kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF), các thành phần, kỹ thuật và đặc điểm của hệ thống RoF. Ứng dụng RoF trong các lĩnh vực như: Wireless LAN, mạng thông tin giao thông (RVC), mạng di động 5G.

## **1.1. Giới thiệu**

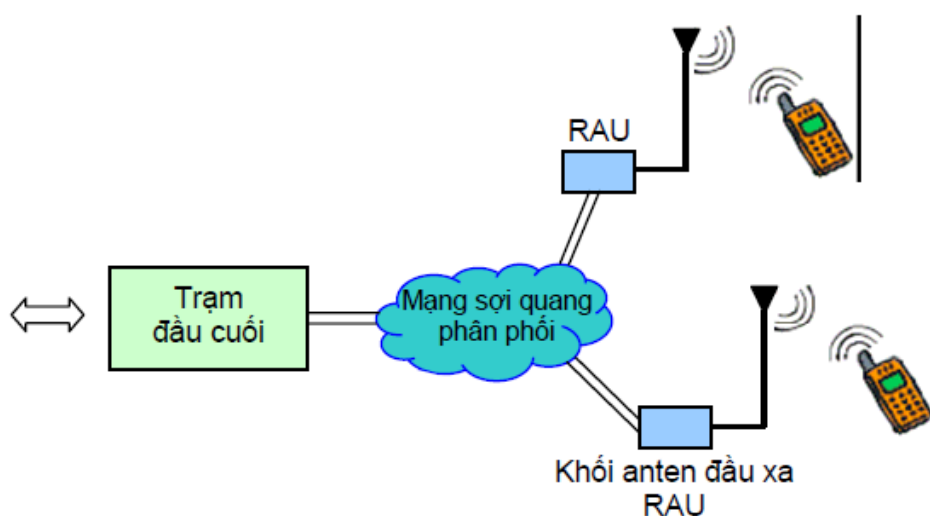
Mạng không dây ngày nay đã và đang dần tiến tới một sự kết hợp bằng việc cung cấp nhiều hơn các dịch vụ cho cùng một thiết bị di động. Trong các mạng tế bào khác nhau cũng có thể thay đổi tự động để đáp ứng các yêu cầu về phân bổ lưu lượng một cách linh hoạt. Việc sử dụng đồng thời các phương pháp đa truy nhập như TDMA, TD-CDMA và WCDMA cũng sẽ làm tăng độ phức tạp và chi phí vận hành tại các trạm cơ sở.

Các thiết bị đầu cuối của người dùng giờ đây không chỉ đơn giản dừng lại ở nghe gọi, SMS hay lướt web đơn thuần nữa. Những yêu cầu về dịch vụ ngày càng cao như video thời gian thực, internet tốc độ cao đòi hỏi tính di động và băng thông rộng tăng lên. Cũng chính vì đặc điểm hạn chế về điện năng tiêu thụ và giá thành mà sự phát triển các thiết bị người dùng này luôn có những giới hạn nhất định, lúc này việc tập trung phát triển sẽ là nhiệm vụ của các trạm cơ sở. Tuy nhiên, việc phức tạp hóa các trạm cơ sở sẽ kéo theo những chi phí đáng kể nếu số lượng trạm tăng lên khi triển khai mạng lớn. Một phương án được đưa ra là chuyển các phần phức tạp của mạng này về trạm xử lý trung tâm, ở đó các nguồn lực đầu tư có thể chia đều cho một số lượng người dùng rất lớn.

Bằng cách sử dụng các sợi cáp quang độ tuyến tính cao để phân phối tín hiệu RF từ trạm trung tâm tới các điểm truy cập, kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang cho phép các điểm truy cập vô tuyến trở nên cực kỳ đơn giản, với các thiết bị chuyển đổi quang điện và bộ khuếch đại. Tất cả các chức năng như chuyển đổi, mã hóa, điều chế đều được thực hiện tại trạm trung tâm. Việc này giúp tiết kiệm chi phí và tăng khả năng vận hành cho các điểm truy cập, đồng thời việc xử lý tập trung tại trạm trung tâm giúp cho quá trình phân bổ và quản lý tài nguyên động trở nên tối ưu hơn.

## 1.2. Khái niệm truyền sóng vô tuyến qua sợi quang

Công nghệ truyền sóng vô tuyến qua sợi quang sử dụng đường truyền sợi quang để phân phối các tín hiệu tần số vô tuyến (RF) từ các vị trí trạm đầu cuối tập trung tới các khối anten đầu xa (RAUs). Trong hệ thống thông tin băng hẹp và WLANs, các chức năng xử lý tín hiệu RF như nâng tần, điều chế sóng mang và ghép kênh, được thực hiện ở các trạm gốc BS hoặc ở RAP và ngay sau đó được đưa tới anten. Công nghệ RoF cho phép tập trung các chức năng xử lý tín hiệu RF tại một vị trí chung (trạm đầu cuối), sau đó sử dụng sợi quang có suy hao thấp (0,3 dB/km cho bước sóng 1550 nm, 0,5 dB/km cho bước sóng 1310 nm) để phân phối tín hiệu RF tới các RAU như minh họa trong hình 1.1.

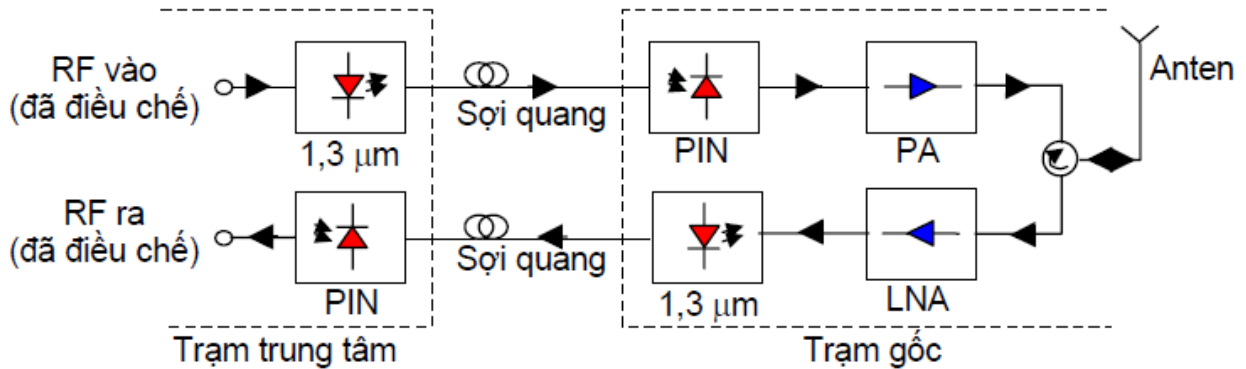


Hình 1. 1. Khái niệm về hệ thống RoF

Nhờ công nghệ RoF các RAU được đơn giản hóa đáng kể, chúng chỉ còn chức năng chuyển đổi quang-điện và khuếch đại. Việc tập trung các chức năng xử lý tín hiệu RF cho phép chia sẻ thiết bị, phân bổ động tài nguyên và đơn giản hóa vận hành, bảo dưỡng hệ thống. Những ưu điểm này làm giảm chi phí lắp đặt và vận hành của hệ thống, đặc biệt trong các hệ thống thông tin vô tuyến băng rộng cần mật độ BS/RAPs cao.

Một trong những ứng dụng của RoF được mô tả như hình 1.2, hệ thống được sử dụng để phân phối tín hiệu GSM. Tín hiệu RF được sử dụng để điều biến trực tiếp laser ở trạm trung tâm. Tín hiệu quang sau khi điều chế cường độ được truyền trên sợi quang tới trạm gốc BS (RAU). Tại RAU tín hiệu RF được khôi phục bằng cách tách sóng trực tiếp ở bộ tách sóng quang PIN.

Tín hiệu sau đó được khuếch đại và được bức xạ ra nhờ Anten. Tín hiệu đường lên từ máy di động MU được đưa từ RAU tới trạm trung tâm cũng theo cách này. Phương thức truyền tín hiệu RF qua sợi quang này được gọi là điều chế cường độ với tách sóng trực tiếp (IM-DD) và là hình thức đơn giản nhất của RoF. thống RoF.



Hình 1. 2. Hệ thống quang-vô tuyến 900 MHz

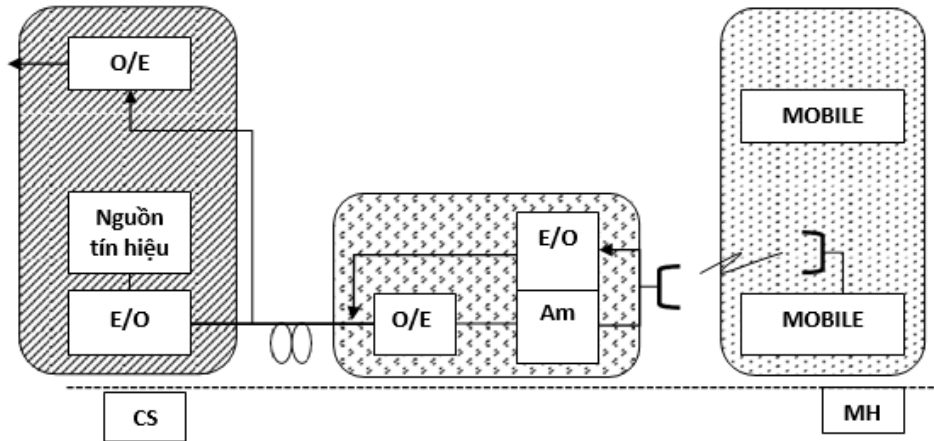
### 1.3. Các thành phần cơ bản của tuyến quang sử dụng RoF

Mobile Host (MH): đó là các thiết bị di động trong mạng đóng vai trò là các thiết bị đầu cuối. Các MH có thể là điện thoại di động, máy tính bảng, máy tính xách tay hay các máy chuyên dụng khác có tích hợp chức năng truy nhập vào mạng không dây.

Base Station (BS): Như đã nói ở phần mở đầu, trong kiến trúc mạng RoF thì BS phải rất đơn giản, nó có nhiệm vụ phát sóng vô tuyến nhận được từ CS đến các MH và nhận sóng vô tuyến gửi từ MH để truyền về CS. Mỗi BS sẽ phục vụ một microcell. BS không có chức năng xử lý tín hiệu, nó chỉ đơn thuần biến đổi thành phần điện/quang và ngược lại để chuyển về hoặc nhận từ CS. BS gồm 2 thành phần quan trọng nhất là ăng-ten và thành phần chuyển đổi quang/điện ở tần số RF (đối với RF over Fiber). Tùy bán kính phục vụ của mỗi BS mà số lượng BS để phủ sóng một vùng là nhiều hay ít. Bán kính phục vụ của BS thường rất nhỏ và phục vụ cho một số lượng vài chục đến vài trăm các MH.

Central Station (CS): trạm xử lý trung tâm. Tùy vào khả năng của kỹ thuật RoF mà mỗi CS có thể phục vụ các BS ở xa hàng chục km, nên mỗi CS có thể nối đến hàng ngàn các BS. Do kiến trúc mạng tập trung nên tất cả các chức năng như định tuyến, cấp phát kênh, ... đều được thực hiện ở CS, vì thế có thể nói CS là thành phần quan trọng nhất trong mạng RoF (cũng giống như tổng đài trong mạng điện thoại). CS cũng được nối đến các tổng đài, server khác.

Một tuyến quang nối giữa BS và CS nhằm truyền dẫn tín hiệu giữa chúng với nhau.



Hình 1. 3. Các thành phần cơ bản trong kiến trúc RoF

Các thành phần thuộc kiến trúc RoF không có chức năng quang như ăng-ten thu phát vô tuyến thuộc phần vô tuyến, chức năng xử lý giao tiếp của CS thuộc phần mạng ta không xét ở đây. Kỹ thuật RoF được khảo sát ở đây bao gồm tất cả các kỹ thuật phát và truyền dẫn sóng radio từ CS tới BS trên sợi quang và ngược lại.

#### 1.4. Các kỹ thuật sử dụng trong RoF

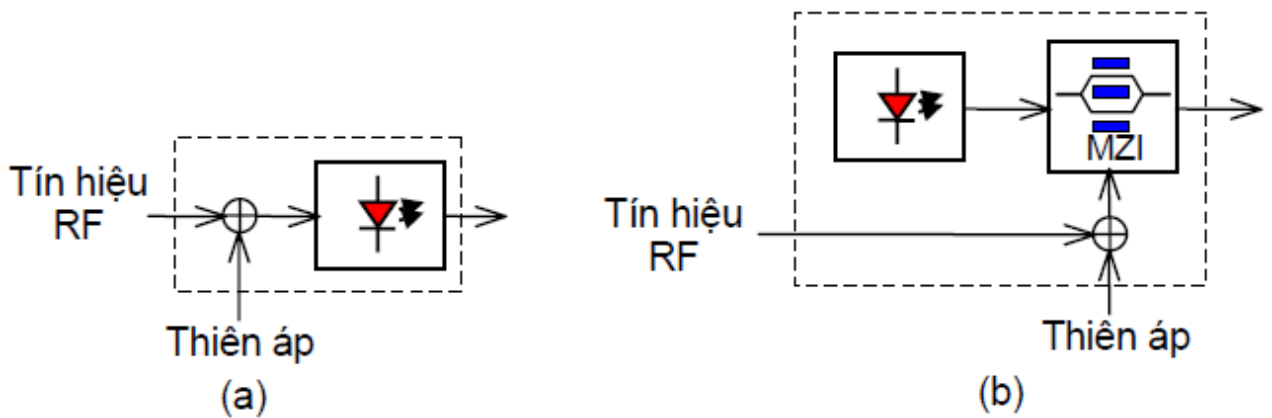
Nhiều kỹ thuật xử lý tín hiệu quang được sử dụng để tạo và truyền tải tín hiệu cao tần qua sợi quang. Nếu so sánh tần số của tín hiệu RF đi vào một tuyến RoF ở trạm đầu cuối với tần số tín hiệu RF được tạo ra ở RAU thì có thể chia các kỹ thuật RF làm 3 loại: truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RFoF); truyền tín hiệu trung tần qua sợi quang (IFoF) và truyền tín hiệu băng tần cơ sở qua sợi quang (BBoF). RFoF thực sự truyền dẫn các tín hiệu cao tần qua sợi quang. Trong IFoF và BBoF tín hiệu cao tần được tạo ra tại RAU nhờ bộ nâng tần cùng với một bộ tạo dao động (LO) ở RAU hoặc truyền từ trạm trung tâm tới RAU. Các cơ chế yêu cầu có LO riêng biệt ở RAU sẽ khiến cho RAU đắt hơn, đặc biệt là trong các ứng dụng sóng mm.

Các kỹ thuật RoF cũng có thể được phân loại dựa vào các nguyên lý điều chế và tách sóng được sử dụng. Khi đó RoF được chia làm 2 loại: Điều chế biên độ và tách sóng trực tiếp (IM-DD) và tách sóng Heterodyne đầu xa (RHD). Hệ thống RFoF được xếp vào loại IM-DD. Còn IFoF và BBoF sử dụng LO tại RAU cũng có thể sử dụng IM-DD để truyền số liệu băng tần cơ sở hoặc IF tới RAU. Tuy nhiên, trong hầu hết các trường hợp, IFoF và BBoF dựa vào RHD để tạo tín hiệu RF.



### 1.4.1. Công nghệ RoF sử dụng kỹ thuật IM-DD

Phương thức đơn giản nhất để phân phối tín hiệu RF là điều chế cường độ nguồn sáng với chính tín hiệu RF và sau đó sử dụng tách sóng trực tiếp ở bộ tách sóng quang để khôi phục lại tín hiệu RF. Phương thức này thuộc về IM-DD và loại RFoF. Có 2 cách để điều chế nguồn sáng: cách thứ nhất là để tín hiệu RF trực tiếp điều chế dòng điện của laser; cách thứ hai là điều khiển laser ở chế độ sóng liên tục và sau đó sử dụng một bộ điều chế ngoài như bộ điều chế Mach-Zehnder (MZM), để điều chế cường độ ánh sáng. Hai trường hợp trên được minh họa trong hình 1.4. Trong cả 2 trường hợp, tín hiệu điều chế là tín hiệu RF thực sự. Tín hiệu RF phải được điều chế với số liệu trước khi được phát đi.



Hình 1. 4. Tạo tín hiệu RF bằng điều chế cường độ

(a. Cửa Laser; b. Dùng một bộ điều chế ngoài)

Sau khi truyền qua sợi và tách sóng trực tiếp tại bộ tách sóng quang, dòng quang điện phải qua bộ khuếch đại phối hợp trở kháng để làm tăng biên độ điện áp trước khi kích thích anten.

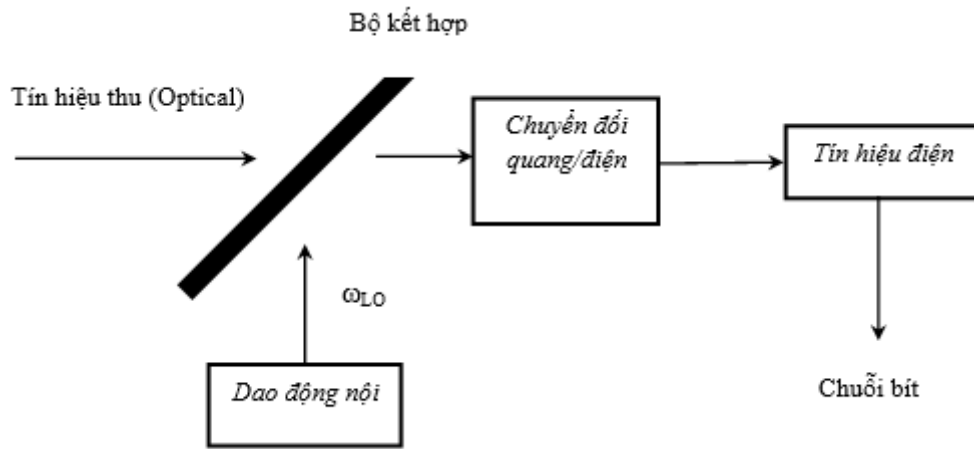
### 1.4.2. Công nghệ RoF sử dụng kỹ thuật tách heterodyne đầu xa RHD

Trong kỹ thuật optical heterodyne, hai hay nhiều tín hiệu quang được truyền đồng thời và chúng có tính quan hệ với nhau tới đầu thu. Và một trong số chúng kết hợp với nhau (được gọi là tích với nhau) sẽ tạo ra được tín hiệu vô tuyến ban đầu. Ví dụ 2 tín hiệu quang được phát ở băng tần ở xung quanh bước sóng 1550nm có khoảng cách rất nhỏ 0.5nm. Tại đầu thu, sự kết hợp 2 sóng quang này bằng kỹ thuật heterodyne sẽ tạo ra một tín hiệu điện ở tần số 60GHz ban đầu mà ta đã truyền đi. Sơ đồ khối phía thu của kỹ thuật được mô tả trong hình sau:

Hầu hết các kỹ thuật RoF đều dựa vào nguyên lý trộn kết hợp (coherent) trong bộ tách sóng quang để tạo ra tín hiệu RF. Các kỹ thuật này được gọi chung là các kỹ



thuật tách sóng heterodyne đầu xa (RHD). Trong khi chuyển đổi quang điện O/E, bộ tách sóng quang cũng đóng vai trò như là một bộ trộn do đó nó trở thành một phần tử chính cấu thành hệ thống RoF dùng kỹ thuật RHD.<sup>[2]</sup>



Hình 1. 5. Sơ đồ khối kỹ thuật tách sóng heterodyne

Nguyên lý trộn kết hợp được minh họa như sau. Hai trường quang có tần số góc  $\omega_1$  và  $\omega_2$  được biểu diễn:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega_1 t) \quad (1.1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega_2 t) \quad (1.2)$$

Nếu cả hai trường tác động lẫn nhau trên một bộ tách sóng quang PIN, dòng tách quang trên bề mặt sẽ tỉ lệ với bình phương của tổng các trường quang. Dòng tách quang danh định là:

$$i_{PD} = (E_1 + E_2)^2 \quad (1.3)$$

$$i_{PD} = E_{01} E_{02} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] + E_{01} E_{02} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t] + \text{các thành phần khác} \quad (1.4)$$

Thành phần cần quan tâm là  $E_{01} E_{02} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]$  thể hiện rằng, bằng cách điều khiển sự khác biệt về tần số giữa hai trường quang, có thể tạo ra tín hiệu vô tuyến ở bất kỳ tần số nào. Giới hạn trên duy nhất của các tần số vô tuyến được tạo ra bằng phương thức này chính là giới hạn băng thông của bản thân bộ tách sóng quang. Nếu xét các tín hiệu công suất quang thay cho các trường quang thì dòng tách quang được tính:

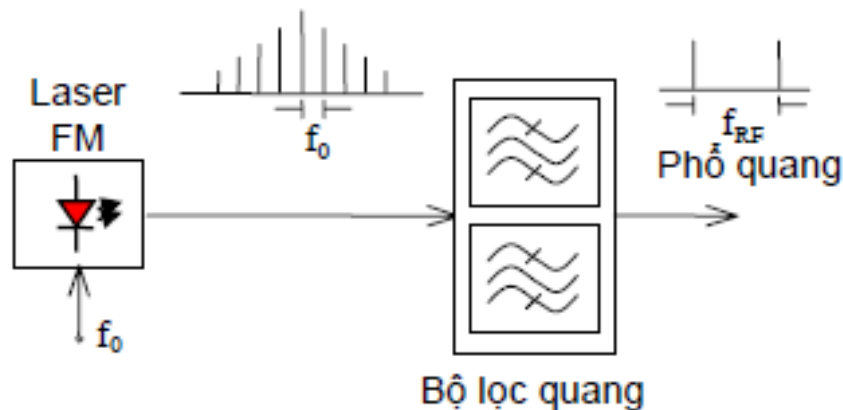
$$i_{PD} = 2R \sqrt{p_1(t)p_2(t)} \cdot \cos[\{\omega_1(t) - \omega_2(t)\}t + \phi_1(t) - \phi_2(t)] + \text{các thành phần khác} \quad (1.5)$$

Với  $R$  là độ nhạy của bộ tách sóng quang,  $t$  là thời gian,  $p_1(t)$  và  $p_2(t)$  là tín hiệu hai công suất quang tức thời tương ứng với tần số tức thời  $\omega_1(t)$  và  $\omega_2(t)$ ,  $\phi_1(t)$  và  $\phi_2(t)$  là các pha tức thời của tín hiệu.

Phương trình (1.5) cho thấy sự ổn định tần số tức thời của các tín hiệu được tạo ra nhờ RHD phụ thuộc vào độ lệch tần số tức thời giữa 2 sóng mang quang được trộn. Vì vậy, trong RHD, cần thiết phải điều khiển độ lệch tần số tức thời một cách chính xác để giữ tần số của tín hiệu phát ra ổn định. Thường thì chỉ có một trong hai sóng mang quang được điều chế với số liệu.

Có nhiều phương thức tạo ra hai sóng mang quang cho tách sóng heterodyne kết hợp. Phương thức thứ nhất là sử dụng bộ điều chế quang để tạo ra nhiều biên tần quang và sau đó chọn các biên tần cần thiết. Một phương thức khác là sử dụng 2 nguồn laser riêng biệt. Hai laser được chế tạo để phát ra ánh sáng có tần số (bước sóng) lệch nhau một khoảng bằng tần số vô tuyến mong muốn. Sau đây xin trình bày một kỹ thuật thuộc phương thức thứ nhất, kỹ thuật tạo hai sóng mang quang sử dụng laser điều tần (FM) và bộ lọc quang<sup>[1]</sup>.

Kỹ thuật điều tần kết hợp lọc quang sử dụng một laser, điều chế tần số quang được thực hiện bằng cách sử dụng một tín hiệu điện để điều khiển laser. Khi đó laser sẽ phát ra một chuỗi các vạch phổ quang cách nhau một khoảng chính bằng tần số điều khiển  $f_0$  như trong hình 1.6. Hai vạch phổ quang cách nhau một khoảng bằng tần số vô tuyến  $f_{RF}$  mong muốn sẽ được chọn ra nhờ sử dụng bộ lọc quang. Tiếp theo, hai sóng quang này được truyền trên sợi quang đến bộ tách sóng quang và trộn kết hợp để tạo ra tín hiệu RF mong muốn theo nguyên tắc như đã trình bày ở trên.



### 1.4.3. Nhiễu

Trên thực tế có rất nhiều hiện tượng, nguyên nhân trên tuyến truyền dẫn cũng như các linh kiện khiến cho chất lượng tín hiệu thu được không như mong muốn. Trong phần này ta sẽ tìm hiểu các nguyên nhân đó và biện pháp để cải thiện chúng.

- **Nhiều pha**

Một trong những nguồn nhiễu ảnh hưởng đến hệ thống thông tin quang coherent đó là nhiễu pha được gây ra bởi laser phát hay nguồn dao động nội. Nhiễu pha hình thành do nhiều nguyên nhân như sự không ổn định tần số phát của laser, hiện tượng chirp, pha không ổn định của thiết bị phát... Ta có:

$$I(t) = I_{ref} + 2R\sqrt{P_s P_{ref}} \cos(\varphi_s - \varphi_{ref}) \text{ cho homodyne} \quad (1.6)$$

$$I(t) = I_{ref} + 2R\sqrt{P_s P_{ref}} \cos(\omega_0 t + \varphi_s - \varphi_{ref}) \text{ cho heterodyne} \quad (1.7)$$

Ta thấy rằng sự thay đổi về pha của nguồn phát  $\varphi_s$  hay bộ giao động nội  $\varphi_{ref}$  đều dẫn tới sự không ổn định về dòng điện thu được ở ngõ ra bộ tách sóng dẫn tới suy giảm SNR. Để hạn chế hiện tượng nhiễu pha, người ta cần dùng các kỹ thuật để giữ ổn định pha  $\varphi_s$  của nguồn laser và pha  $\varphi_{ref}$  của nguồn dao động nội.

Nhiễu pha còn gây ra bởi bề rộng phổ của laser. Bề rộng phổ  $\Delta\nu$  càng nhỏ thì nhiễu pha càng được hạn chế. Vì vậy người ta thường sử dụng laser DFB để làm nguồn phát, độ rộng phổ của laser DFB có thể nằm ở mức 1MHz.

- **Mất phối hợp phân cực**

Trong các bộ tách sóng quang trực tiếp (như bằng photodiode) đã biết thì sự phân cực của tín hiệu quang không đóng vai trò gì bởi vì dòng điện thu được phụ thuộc vào số photon của tia tới. Tuy nhiên trong các bộ thu RHD, sự hoạt động của chúng còn phụ thuộc vào sự phối hợp phân cực của bộ dao động và tín hiệu thu được.

- **Tán sắc**

Ta đã biết tán sắc ảnh hưởng lớn như thế nào đối với hệ thống thông tin quang và được khắc phục bằng nhiều phương pháp. Đặc biệt, trong hệ thống thông tin quang coherent thì hiện tượng tán sắc ảnh hưởng còn nghiêm trọng hơn. Nó làm giảm cấp tín hiệu một cách nhanh chóng trên đường truyền. Trong thông tin quang

coherent thì người ta hạn chế hiện tượng này bằng cách sử dụng các laser có bề rộng phổ rất nhỏ. Hạn chế tối đa hiện tượng chirp. Và đặc biệt là kỹ thuật bù tán sắc bằng một bộ cân bằng điện tử trên ở tần số IF.

#### **1.4.4. Nhận xét**

Mặc dù kỹ thuật optical homodyne có rất nhiều ưu điểm nhưng do phải duy trì sự đồng bộ về pha và tần số. Điều này được thực hiện bằng một vòng khóa pha, tuy nhiên như thế sẽ làm tăng giá thành của các BS vì chúng phải được trang bị các laser rất ổn định và phải có vòng khóa pha. Điều này không có lợi trong mạng RoF nên người ta không sử dụng kỹ thuật này để truyền dẫn sóng mm.

So với homodyne thì kỹ thuật heterodyne có tỉ số SNR nhỏ hơn 3dB so với cùng 1 công suất tới (do chứa thành phần cos). Nhưng kỹ thuật này yêu cầu đơn giản hơn vì bộ dao động laser không nhất thiết phải cùng tần số với sóng tới và pha chỉ cần lệch nhau một lượng không đổi. Nhờ vậy mà các BS được cấu trúc đơn giản hơn, không cần sử dụng vòng khóa pha quang. Tuy nhiên, như vậy không có nghĩa là kỹ thuật heterodyne trở nên đơn giản. Yếu tố quan trọng nhất tác động tới hệ thống sử dụng kỹ thuật heterodyne là lệch phân cực. Thông thường, 2 nguồn laser khác nhau thì thường gây ra hiện tượng không ổn định về pha. Do đó người ta sử dụng chung một nguồn phát hay cả hai nguồn phát này được khóa pha với nhau. Nhờ vậy ở đầu thu không cần phải có bộ dao động nội, tín hiệu tham chiếu được tạo ra ở đầu phát và truyền đi song song với tín hiệu trong sợi quang tới đầu thu. Điều này giúp cho cấu trúc BS càng đơn giản hơn vì không cần phải có bộ dao động.

Ta có thể nhận thấy một số ưu điểm của kỹ thuật này. Ưu điểm thứ nhất đó là cấu trúc BS đơn giản do nguồn tham chiếu RF được tạo ra từ CS, nguồn RF tham chiếu được khóa pha với Laser phát chính. Cả nguồn tham chiếu lẫn tín hiệu được truyền đi trong cùng sợi quang. Chú ý rằng, nguồn tham chiếu được truyền với tần số RF trong khi đó thì tín hiệu được điều chế ở tần số IF. Ưu điểm thứ hai đó là tín hiệu được truyền đi với tần số IF (chưa điều chế) – Gọi là tín hiệu chưa điều chế vì vẫn ở tần số trung tần, nhưng thực chất nó đã được điều chế sang dạng quang. Điều này giúp cho tín hiệu được truyền đi xa hơn mà ít bị ảnh hưởng đến hiện tượng tán sắc hơn. Đến BS, nguồn tín hiệu IF này sẽ được điều chế lên tần số RF bởi nguồn tham chiếu RF tại Photodetector và phát đi, tín hiệu lúc này gọi là modulated signal vì nó ở tần số RF.

## **1.5. Đặc điểm của hệ thống RoF**

### **1.5.1. Những ưu điểm của công nghệ RoF**

#### ***Suy hao thấp***

Sự phân phối những tín hiệu điện sóng ngắn tần số cao trong không gian tự do hoặc qua đường truyền dẫn kim loại là vấn đề khó giải quyết và đòi hỏi chi phí lớn. Trong khi đó với sợi quang có suy hao rất thấp, công nghệ RoF cùng lúc có thể có được cả sự phân phối sóng mm suy hao thấp và đơn giản hóa RAU. Các sợi đơn mode (SMF) làm từ thủy tinh có suy hao dưới 0,2 dB/km và 0,5 dB/km tại các cửa sổ 1550 nm và 1300 nm. Sợi quang chất dẻo (POF) công bố gần đây có suy hao từ 10-40 dB/km trong vùng 500-1300 nm. Những suy hao này thấp hơn nhiều so với cáp đồng trục. Ví dụ, suy hao của cáp đồng trục ½ inch (RG- 214) hơn 500 dB/km cho các tần số trên 5 GHz. Vì vậy nhờ truyền sóng siêu cao tần trên sợi quang, khoảng cách truyền dẫn tăng nhiều lần và yêu cầu về công suất giảm đi đáng kể.

#### ***Băng thông rộng***

Sợi quang có băng thông khổng lồ. Có ba cửa sổ truyền dẫn chính, suy hao thấp, cụ thể là các bước sóng 850nm, 1310 nm, 1500 nm. Với một sợi quang đơn mode, băng thông tổng của 3 cửa sổ này vượt quá 50 THz. Tuy nhiên các hệ thống thương mại hiện nay mới chỉ tận dụng được một phần nhỏ dung lượng này (1,6 THz). Băng thông khổng lồ của sợi quang còn có nhiều ưu điểm khác ngoài dung lượng cao để truyền dẫn tín hiệu siêu cao tần. Băng tần quang lớn cho phép xử lý tín hiệu tốc độ cao, công việc rất khó hoặc không thể thực hiện trong các hệ thống điện tử. Nói cách khác một số chức năng như lọc, trộn, nâng, hạ tần có thể được thực hiện trong miền quang.

#### ***Không chịu ảnh hưởng của nhiễu điện từ vô tuyến***

Không chịu ảnh hưởng của nhiễu điện từ là một đặc tính hấp dẫn của thông tin sợi quang, đặc biệt trong truyền dẫn sóng vô tuyến tần số cao. Đó là bởi vì các tín hiệu được truyền dưới dạng ánh sáng qua sợi quang. Cũng chính vì không bị ảnh hưởng của nhiễu điện từ nên thông tin sợi quang có khả năng chống nghe trộm, đây là một đặc tính quan trọng của thông tin sợi quang khi cung cấp an ninh và bảo mật.

### ***Lắp đặt và bảo dưỡng dễ dàng***

Trong hệ thống RoF, các thiết bị phức tạp và đắt tiền được đặt tại các trạm đầu cuối, khiến cho các RAU đơn giản hơn. Sự sắp xếp này làm cho RAU nhỏ hơn và nhẹ hơn, làm giảm giá thành lắp đặt và bảo dưỡng hệ thống. Việc lắp đặt dễ dàng và giá thành bảo dưỡng thấp của RAU là rất quan trọng đối với các hệ thống sóng mm, bởi vì các hệ thống này cần một số lượng lớn các RAU. Các RAU nhỏ hơn không chỉ giảm giá thành mà còn giảm các tác động đến môi trường.

### ***Giảm công suất tiêu thụ***

Giảm công suất tiêu thụ là kết quả của việc sử dụng RAU đơn giản và thiết bị rút gọn. Hầu hết các thiết bị phức tạp đều được đặt tại các đầu cuối tập trung. Trong một số ứng dụng các RAU hoạt động ở chế độ thụ động. Việc giảm tiêu thụ năng lượng tại RAU rất quan trọng khi tính đến việc các RAU được đặt ở nơi xa, những nơi chưa có mạng lưới điện.

### ***Phân bổ tài nguyên động***

Vì chuyển mạch, điều chế và các chức năng RF khác được thực hiện tại trạm đầu cuối nên có thể phân phối dung lượng động. Ví dụ trong hệ thống phân phối RoF với lưu lượng GSM, dung lượng có thể được phân bổ thêm tới một vùng trong các thời gian cao điểm và sau đó phân bổ lại cho các vùng khác khi hết thời gian cao điểm. Điều này có thể đạt được bằng cách cấp phát thêm các bước sóng quang nhờ kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) khi nhu cầu tăng lên. Cấp phát dung lượng động là cần thiết, vì nó giúp ta tránh được sự lãng phí tài nguyên do lưu lượng trên mạng biến đổi thường xuyên.

### ***1.5.2. Hạn chế của công nghệ RoF***

Vì RoF liên quan tới điều chế tương tự và tách sóng ánh sáng nên về cơ bản đây là một hệ thống truyền dẫn tương tự. Do đó tín hiệu bị ảnh hưởng bởi nhiễu và méo, đây là hạn chế trong các hệ thống thông tin tương tự cũng như hệ thống RoF. Những ảnh hưởng này có xu hướng giới hạn là hệ số nhiễu (NF) và dải động (DR) của các tuyến RoF.

Nguồn tạp âm trong đường truyền sợi quang tương tự bao gồm tạp âm cường độ tương đối của laser (RIN), nhiễu pha laser, nhiễu nơ của bộ tách sóng quang, nhiễu nhiệt của bộ khuếch đại, tán sắc của sợi. Trong hệ thống RoF sử dụng sợi đơn mode, tán sắc màu giới hạn chiều dài tuyến và cũng là nguyên nhân



làm tăng nhiều pha sóng mang RF. Trong hệ thống RoF sử dụng sợi đa mode, tán sắc mode giới hạn nghiêm trọng băng tần và khoảng cách tuyến truyền dẫn.

## **1.6. Ứng dụng của truyền sóng vô tuyến qua sợi quang (RoF)**

### **1.6.1. Ứng dụng RoF trong Wireless LAN bằng tần 60GHz**

Kỹ thuật RoF được ứng dụng cho mạng WLAN sẽ là một trong những ứng dụng hứa hẹn nhất, với các BS chỉ thực hiện các chức năng đơn giản và được kết nối đến CS thông qua một sợi quang, các chức năng định tuyến và xử lý được tập trung tại CS. Tuy nhiên, trong mạng WLAN này, do bán kính phủ sóng của các BS nhỏ nên mỗi sự di chuyển của MH sẽ cần phải có yêu cầu chuyển giao. Do sự chuyển giao thực hiện liên tục khi MH di chuyển nên trong mạng WLAN này cần phải có một giao thức chuyển giao đơn giản nhưng phải tin cậy ở băng tần mm. Trong phần này chúng ta sẽ đề cập tới giao thức MAC, được gọi là “Chess Board Protocol” (Giao thức chuyển giao bàn cờ) được ứng dụng cho mạng WLAN sử dụng kỹ thuật RoF hoạt động ở băng tần 60GHz, với đặc tính chuyển giao nhanh và đơn giản, tích hợp QoS. Với khả năng điều khiển tập trung của mạng RoF, nó dựa vào mã chuyển mạch tần số FS để cung cấp một cơ chế chuyển giao đơn giản, các picocell liên nhau được ấn định các mã FS trực giao với nhau để tránh hiện tượng giao thoa đồng kênh. Cơ chế này cho phép các MH có thể hiệu chỉnh tần số trong suốt quá trình chuyển giao, đó chính là đặc tính quan trọng nhất của giao thức chuyển giao bàn cờ.

#### **1.6.1.1. Kiến trúc mạng**

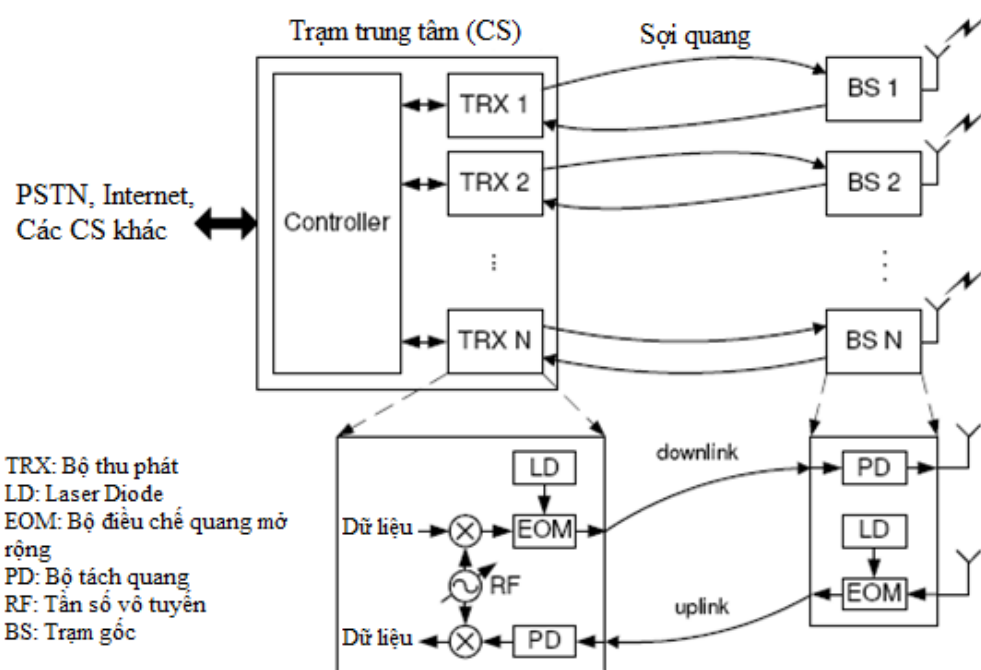
Đối với mạng WLAN, do cấu trúc mạng cần đơn giản, các thiết bị giá thành rẻ nên thường mạng sử dụng các kỹ thuật càng đơn giản càng tốt. Đối với mạng WLAN trong chương này ta giả sử chúng có đặc tính sau: (i) song công phân tần số và (ii) khả năng thay đổi kênh RF động. Hình 1.7 chỉ ra một ví dụ về kiến trúc RoF được ứng dụng trong mạng WLAN.

Với kiến trúc này, mạng sử dụng phương pháp điều chế sóng mang con, phương pháp đơn giản và có thể sẽ được sử dụng rộng rãi trong mạng RoF. Trong kỹ thuật này, dữ liệu từ tuyến truyền dẫn theo hướng downlink (từ CS tới MH) đầu tiên được điều chế lên miền tần số RF thích hợp bởi một nguồn vô tuyến (được gọi là subcarrier) sau đó mới được điều chế lên miền quang (được gọi là main carrier) bằng một nguồn quang. Tín hiệu này được truyền trên sợi quang đến BS, ở đây

các tín hiệu quang lại được chuyển về thành tín hiệu vô tuyến và được phát đi từ BS đến các MH. Đối với tuyến uplink thì các tín hiệu nhận được ở BS sẽ được điều chế sang miền quang bằng một nguồn quang. Nó được truyền dẫn thông qua tuyến quang tới CS và được giải điều chế sang tín hiệu vô tuyến ở đây bởi PD. Sau đó các dữ liệu của mỗi user sẽ được tách ra. Do đặc điểm của mạng WLAN là khoảng cách từ BS đến các CS là khoảng vài trăm mét nên ảnh hưởng của các hiện tượng phi tuyến lên tần số RF là tương đối thấp, vì thế tín hiệu truyền trên sợi quang được truyền ở tần số RF. Hoạt động được mô tả trong hình 1.7.

Với kiến trúc cho mạng WLAN này thì mỗi CS sẽ có rất nhiều bộ thu phát (TRX) bằng với số lượng của BS, và mỗi bộ thu phát bao gồm:

- nguồn sáng để phát tín hiệu như laser,
- một PD cho hướng uplink và
- một modem để phát và nhận dữ liệu ở miền RF.



Hình 1. 7. Kiến trúc mạng RoF cho WLAN

Nhìn vào cấu hình trên ta cũng thấy rằng BS chỉ có những chức năng đơn giản là thu và phát tín hiệu, ngoài ra không có chức năng xử lý tín hiệu nào được thực hiện ở BS. Đối với mạng WLAN chúng ta đang khảo sát thì các bộ điều chế ngoài được sử dụng thay cho các LD vì chúng hoạt động ở tần số 60GHz, tần số mà các LD không thể đáp ứng kịp. Các bộ thu phát có thể được trang bị các bộ dao động có thể điều

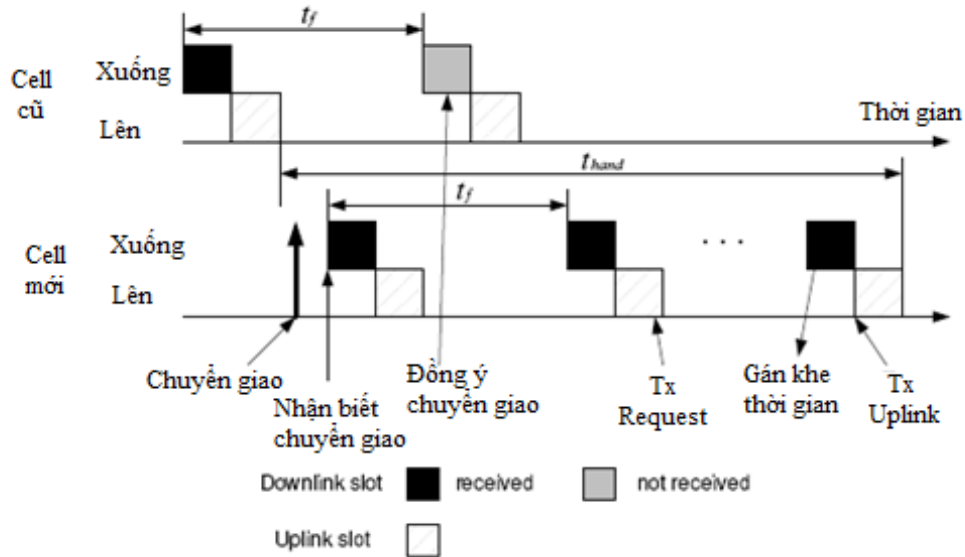


chính được nhưng vì giá thành cao, nên đôi khi chúng được trang bị các bộ dao động với tần số cố định. Sự thay đổi bộ giao động sẽ ảnh hưởng đến quá trình phân bổ tần số cho mạng RoF này.

#### 1.6.1.2. Chuyển giao

Một đặc điểm quan trọng của giao thức bàn cờ này đó là quá trình chuyển giao khi MH di chuyển từ BS này sang BS khác là rất đơn giản và nhanh. Thời gian chuyển giao chỉ mất tối đa  $(2n+1)$  khe thời gian.

Nhờ sự đơn giản và nhanh nên giao thức được sử dụng trong mạng WLAN, để giảm bớt sự phức tạp của các MH. Ta sẽ tìm hiểu một ví dụ chuyển giao khi MH di chuyển từ BS này sang BS khác như hình. Trong hình 1.8 là ví dụ với  $n = 5$ .



Hình 1. 8. Độ trễ chuyển giao trong giao thức chuyển giao bàn cờ

Cơ chế chuyển giao xảy ra như sau: trước hết ở cell cũ các MH nhận tín hiệu cho phép ở khung thời gian có tô màu đen và trả lời lại bằng tại các khe thời gian có đường gạch chéo (đã được mô tả trong giao thức bàn cờ). Lúc này MH sẽ sử dụng cặp tần số  $(f_i, f_{n+i})$  cho 2 chiều up và down. Giả sử MH di chuyển từ picocell cũ sang picocell mới thì nó vẫn sử dụng cặp tần số này cho truyền dữ liệu. Tất nhiên là khi qua cell khác, do tính trực giao (được điều khiển bởi CS) nên nó sẽ hoạt động ở khe thời gian khác do vẫn không thay đổi cặp tần số (đặc điểm của giao thức chuyển giao bàn cờ). Khi nó đến vùng biên giới của cả 2 picocell thì nó đồng thời nhận được cả 2 khe thời gian của cả 2 picocell. Khi đó nó cũng sẽ tiếp tục liên lạc với picocell cũ cho đến khi thiết lập kênh mới với picocell mới được thành lập. Khi liên lạc với picocell cũ

thật sự bị mất do đi quá tầm phủ sóng thì nó mới bắt đầu yêu cầu picocell mới cấp cho nó một kênh để hoạt động, công việc này đã được MH chuẩn bị từ khi nhận được tín hiệu của picocell mới. Việc cấp băng thông cho MH sẽ được thực hiện ở khung tiếp theo. Nhìn vào hình 1.9, ta thấy thời gian chuyển giao tối thiểu là  $2n + 1$  khe thời gian.

Gia nhập vào mạng WLAN: Khi một MH mới bắt đầu gia nhập vào mạng WLAN thì công việc đầu tiên của nó là đồng bộ với CS, sau đó nó chọn một kênh bất kỳ ngẫu nhiên nếu nó có khả năng thay đổi kênh tần số hoặc là sử dụng một kênh định trước nếu nó không có khả năng thay đổi kênh. Sau đó nó lắng nghe ở những khe thời gian tuyến downlink. Nó sẽ nhận được một tín hiệu trong khe thời gian nào đó của khung và ấn định khe thời gian cho MH hoạt động. Sau khi nhận được gói tin ấn định khe thời gian, nó sẽ bắt đầu gửi tín hiệu xác nhận ngay ở khe tiếp theo trong tuyến uplink để gia nhập vào mạng. Sau đó nó bắt đầu truyền nhận dữ liệu trên kênh đã được ấn định.

Ứng dụng kỹ thuật RoF và mạng WLAN hoạt động ở băng tần mm là một trong những ứng dụng đơn giản của kỹ thuật trên vào mạng truy nhập vô tuyến. Với cự ly nhỏ, bán kính phủ sóng các picocell không cần quá lớn, giá thành BS không phải là quá đắt nên các nhược điểm của sóng mm trở nên không đáng kể nữa, trong khi đó các ưu điểm của kỹ thuật như kiến trúc tập trung, băng thông rộng, tính di động cao lại được phát huy. So với mạng WLAN thông thường thì mạng WLAN hoạt động ở băng tần mm có nhiều điểm khác nhau. Từ đặc điểm tổn hao lớn của sóng mm, số lượng BS cần được lắp đặt sẽ nhiều hơn để phủ sóng môi trường trong nhà. Trong nhiều mạng tương tự với số lượng các microcell đủ lớn thì vấn đề quản lý di động là thật sự quan trọng. Với giao thức MAC, gọi là giao thức chuyển giao bàn cờ, với đặc tính là nhanh với chuyển giao đơn giản và tích hợp QoS, nó đã được đề xuất là giao thức trong mạng WLAN hoạt động ở băng tần mm này.

### ***1.6.2. RoF ứng dụng trong mạng thông tin giao thông***

Mạng truyền thông cho các phương tiện giao thông (Road Vehicle Communication - RVC) là cơ sở hạ tầng của mạng ITS (hệ thống vận tải thông minh) được ứng dụng cho các phương tiện đang di chuyển có thể truy cập vào mạng. Từ đó các phương tiện trở thành những thành phần của mạng thông tin và có thể liên lạc với nhau hoặc được sử dụng trong việc điều khiển các phương tiện từ trạm trung tâm. Hệ thống RVC này yêu cầu phải đạt được tốc độ ít nhất 2-10Mbps cho mỗi MH. Hơn nữa,

mạng phải không chỉ hỗ trợ thoại và dữ liệu mà còn phải hỗ trợ các dịch vụ đa phương tiện như video thời gian thực khi các MH đang di chuyển. Từ những mạng thông tin di động tế bào hiện tại phát triển lên băng tần lớn hơn nhưng vẫn không thể nào cung cấp đủ băng thông, do đó các băng tần mm trong khoảng từ 36GHz đến 60GHz đang được xem xét, cải tiến để ứng dụng cho mạng RVC này. Tuy dải băng tần này có băng thông cao hơn so với băng tần đang sử dụng, nhưng bán kính phủ sóng của các cell cũng nhỏ hơn do suy hao trong không gian tăng lên. Do đó đặc tính của mạng RVC đó là số lượng BS lớn để phủ sóng hoàn toàn mọi nơi và số lượng người sử dụng lớn, hỗ trợ tính di động. Như vậy kiến trúc mạng cần các yêu cầu chính sau: (i) mạng phải có giá thành tốt và (ii) tích hợp khả năng chuyển giao nhanh và đơn giản để phục vụ một số lượng các người sử dụng.

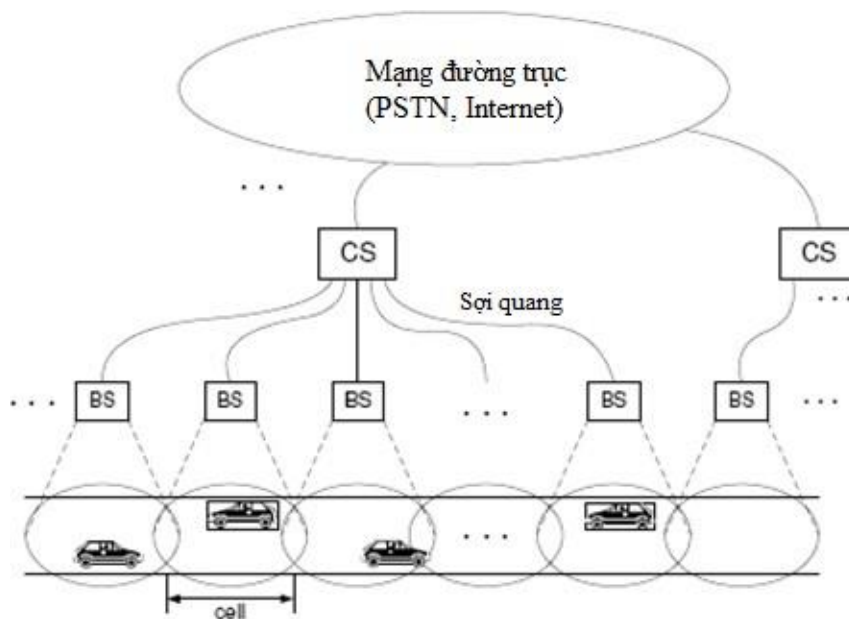
Tuy nhiên, trong RVC thì một thủ tục chuyển giao nhanh thực hiện khó hơn rất nhiều so với môi trường trong nhà, nhất là ở tốc độ dữ liệu cao lẫn tốc độ di chuyển. Để thực hiện được khả năng này, hệ thống phải có cơ chế quản lý chuyển giao để thực hiện việc chuyển giao liên tục và chính xác. Ta có thể lấy một ví dụ là một chiếc xe đang di chuyển với vận tốc 100km/h, thì với bán kính cell là khoảng 100m thì sự chuyển giao thực hiện mỗi 3.6s mỗi lần. Nếu vùng chồng lấn giữa 2 cell là 10m thì yêu cầu chuyển giao phải được thực hiện trong 0.36s. Trong ví dụ này ta đã thấy được trong mạng RVC cần một thủ tục chuyển giao nhanh và đơn giản để đáp ứng yêu cầu di chuyển nhanh của các MH. Đồng thời, trong kiến trúc mạng thì phải tính toán đến vùng chồng lấn của 2 cell đủ lớn sao cho chúng có thời gian chuyển giao và cũng không được quá nhỏ khiến cho số lượng BS tăng lên, không có lợi trong việc quản lý cũng như giá thành mạng tăng.

Trong phần này ta sẽ được tìm hiểu thủ tục thực hiện chuyển giao trong mạng RVC được ứng dụng kỹ thuật RoF với đặc tính là chuyển giao nhanh và đặc biệt là khả năng cấp băng thông động. Nó được thực hiện dựa trên khả năng điều khiển tập trung của mạng RoF để quản lý tính di động một cách hiệu quả.

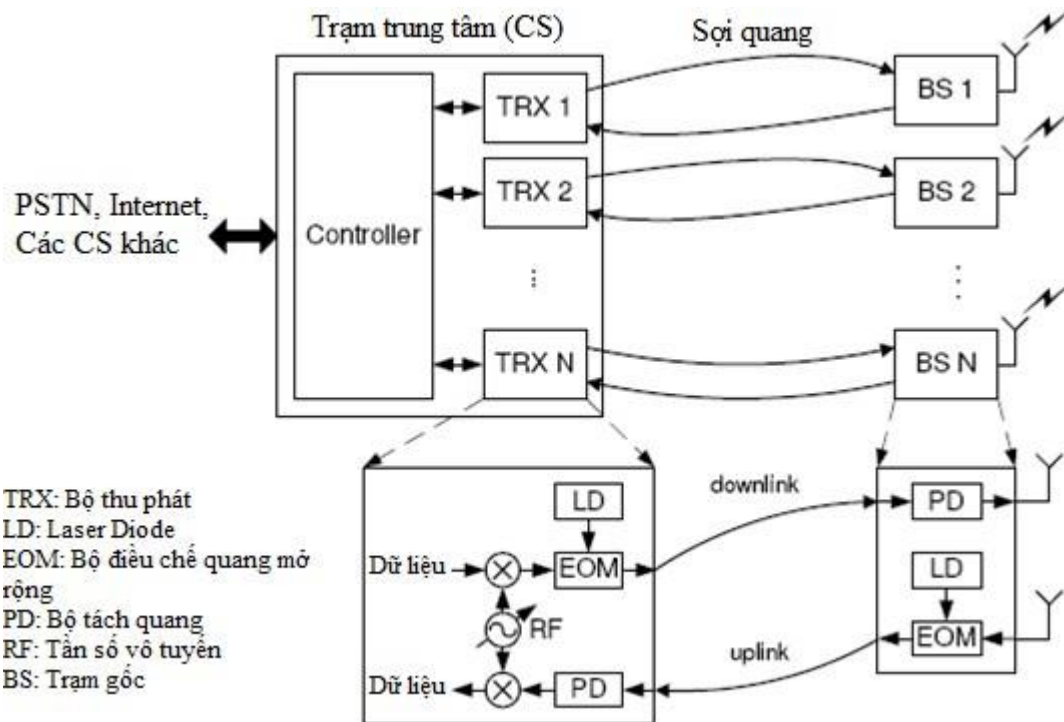
#### Kiến trúc mạng

Hệ thống RVC sử dụng kỹ thuật RoF được thể hiện trong hình 1.9, ở đây mỗi BS được kết nối liên tục đến một số lượng BS thông qua sợi quang, và mỗi BS này phục vụ cho mạng RVC với tầm phủ sóng rộng và các đặc tính phù hợp mạng. Ở chương này ta chỉ khảo sát khi áp dụng trên các con đường một chiều, với hướng di

chuyển của MH đã được CS biết trước. Đối với các đường nhiều chiều, ứng dụng có thể triển khai trong thành phố. Các CS được kết nối đến mạng đường trục, mạng đường trục có thể là mạng PSTN hay là mạng Internet. Mỗi BS sẽ phủ sóng một khu vực mà ta gọi là cell (không gọi là picocell như trong mạng WLAN nữa). Do đặc tính của sóng mm ở băng tần 36GHz cho đến 60GHz có suy hao lớn nên bán kính của mỗi cell chỉ nằm trong khoảng từ vài chục đến vài trăm mét và số lượng BS để phủ sóng nguyên con đường là khá lớn. Để đạt được kiến trúc tập trung và cấu trúc BS đơn giản với tầm phủ sóng CS lớn thì nhiều kỹ thuật RoF được thảo luận trong mục 1.4 sẽ được ứng dụng vào mạng và hiện nay ngày càng được cải tiến.



Hình 1. 9. Mạng RVC dựa trên kỹ thuật RoF



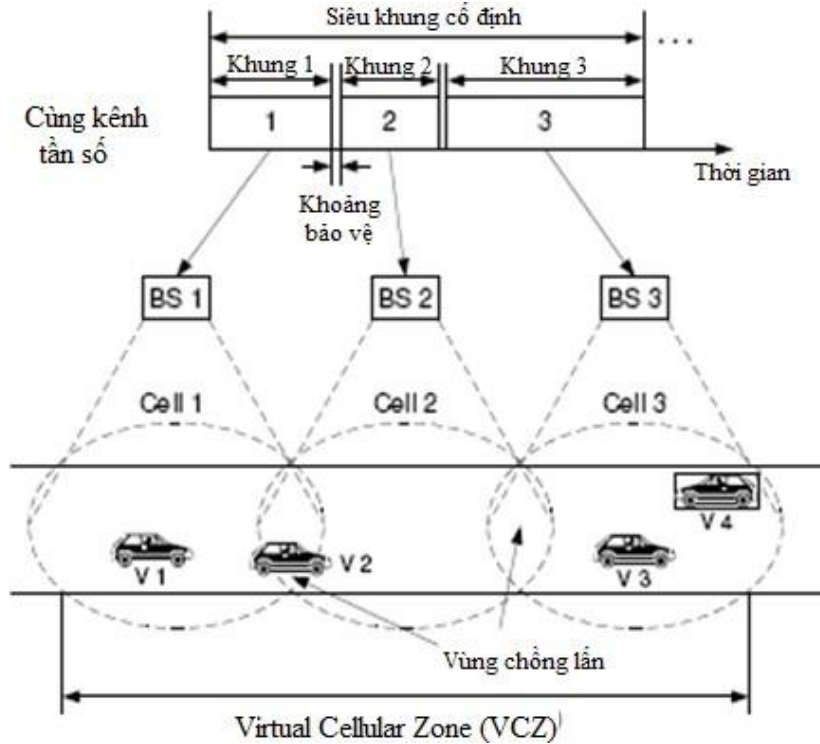
Hình 1. 10. Kiến trúc mạng RVC dựa trên kỹ thuật RoF.

Dựa vào hình 1.10 ta thấy cấu trúc BS rất đơn giản chỉ gồm một PD, một LD, một EOM và có thể có một bộ khuếch tần số RF. BS không thực hiện bất cứ một chức năng xử lý tín hiệu nào, nó chỉ đóng vai trò trung gian chuyển tải sóng RF giữa BS và MH. Mỗi CS sẽ có rất nhiều bộ thu phát TRX (transceiver), mỗi TRX phục vụ cho mỗi BS. TRX có thể được trang bị bộ dao động có tần số cố định hay có thể điều chỉnh được. Với bộ dao động RF điều chỉnh được tần số thì hệ thống có khả năng ấn định tài nguyên mềm dẻo hơn.

#### 1.6.2.1. Hoạt động cơ bản trong mạng

Giả sử CS được kết nối đến N BS như trong hình 1.10, và số lượng BS phủ sóng hoàn toàn con đường. N BS này sẽ được chia làm S nhóm ( $1 < S < N$ ), trong đó tập hợp các BS trong một nhóm được đặt gần nhau, và tập hợp các vùng phủ sóng của nhóm đó được gọi là VCZ (virtual cellular zone). TDMA được sử dụng trong hệ thống với các siêu khung có kích thước cố định, bao gồm M khe thời gian mà mỗi khe được ấn định cho mỗi VCZ, mỗi khe được lấp đầy một gói dữ liệu có kích thước tối thiểu. Kênh RF bên trong một VCZ cũng tương tự, và các VCZ liên kế không được dùng chung kênh RF để tránh hiện tượng giao thoa đồng kênh. Do đó khi một MH đang di chuyển trong cùng VCZ thì chúng không nhất thiết phải đổi kênh tần số. Nó chỉ phải

thay đổi kênh RF khi chuyển sang VCZ khác. Mỗi siêu khung được chia thành các khung nhỏ hơn cho các cell bên trong VCZ, mà mỗi khung bao gồm cả kênh uplink lẫn downlink. Kích thước mỗi khung có thể được thiết kế sao cho cân đối với lưu lượng của mỗi cell.



Hình 1. 11. Ấn định khung trong khi di chuyển.

Hình 1.11 mô tả một VCZ bao gồm 3 cell và 3 frame được ấn định cho mỗi cell trong miền thời gian như thế nào khi sử dụng cùng một kênh RF. Điều cần được nhấn mạnh ở đây là trong mỗi chu kỳ của khung  $i$  thì chỉ có sự trao đổi thông tin của  $BS_i$  với CS được thiết lập, BS trong một VCZ phải được điều khiển bởi CS để tìm ra khung thời gian thích hợp. Vì vậy mỗi kênh RF được ấn định để tránh hiện tượng giao thoa cùng kênh giữa các cell trong cùng VCZ. Nếu thiết bị đi vào khu vực mà không có chồng lấn giữa 2 cell liên tục thì nó chỉ nhận được một khung trong cell mà nó đang đứng. Trong khi đó, khi nó di chuyển vào vùng chồng lấn của cả 2 cell thì nó sẽ phải “lắng nghe” cả 2 khung trong một siêu khung. Ví dụ trong hình 1.11, V1 chỉ nhận được khung 1, trong khi đó V2 lại nhận được cả khung 1 và 2 trong siêu khung đó. Chú ý rằng mỗi khung không chỉ hỗ trợ một thiết bị mà có thể hỗ trợ được nhiều thiết bị như trong cell 3. Như vậy mỗi CS sẽ có nhiều VCZ, số lượng VCZ bằng với số lượng siêu khung được phục vụ một cách đồng thời.

### 1.6.2.2. Hỗ trợ tính di động – chuyển giao

Trong kiến trúc mạng được phát họa ở trên thì mạng RVC sẽ hỗ trợ 3 kiểu chuyển giao:

- chuyển giao giữa 2 BS thuộc cùng 1 VCZ (intra-VCZ handover)
- chuyển giao giữa 2 BS thuộc 2 VCZ kề nhau (inter-VCZ handover)
- chuyển giao giữa 2 BS thuộc sự quản lý của 2 CS khác nhau (inter-CS handover)

Trong tất cả các trường hợp chuyển giao thì vùng chồng lấn giữa 2 BS phải đủ lớn sao cho thiết bị có đủ thời gian để thực hiện chuyển giao. Ví dụ MH di chuyển với vận tốc 100km/h thì di chuyển 1m hết 36ms. Do đó cấu trúc mỗi siêu khung đủ nhỏ (1 ms) thì thủ tục chuyển giao có thể thực hiện trong vòng vài mét.

Tóm lại, mạng truyền thông Road Vehicle trong tương lai sẽ hoạt động ở băng tần mm để đạt được tốc độ dữ liệu cao hơn (từ 2-10Mbps). Đặc tính của mạng RVC là bán kính cell tương đối nhỏ và tính di động của các user cao, do đó cơ chế chuyển giao là một trong những vấn đề quan trọng cần phải giải quyết trong mạng này. Khi kiến trúc mạng hoàn chỉnh, nó sẽ được ứng dụng trên các tuyến đường cao tốc, các BS có thể được lắp đặt tại cái cột đèn ở giữa hay 2 bên đường rất thuận lợi. Khi đó các phương tiện giao thông trên đường có thể liên lạc với nhau hay liên lạc với trung tâm điều khiển, là cơ sở cho mạng điều khiển tự động các phương tiện trong mạng ITS. Tuy nhiên hiện nay mạng cũng chỉ ở mức dự thảo vì còn nhiều vấn đề (các giao thức lớp cao hơn, về mặt kỹ thuật, về mặt kinh tế,...) còn cần phải giải quyết trong tương lai, nhưng những gì được viết ở chương này cho thấy sự khả quan của mạng RVC trong tương lai.

### 1.6.3. RoF ứng dụng trong mạng 5G

Tiêu chuẩn 5G đòi hỏi hiệu quả phổ cao, tốc độ dữ liệu cao và độ trễ ngắn, do đó, mạng truyền dẫn đứng trước nhiều thách thức để đáp ứng khả năng cung cấp cơ sở hạ tầng đáng tin cậy. Các hệ thống vô tuyến qua sợi quang (RoF) là công nghệ tiên phong hứa hẹn cho các mạng 5G trong tương lai. Trong các mạng di động thực tế như LTE-A, phần lớn được triển khai các liên kết RoF kỹ thuật số. Chuyển đổi tín hiệu số sang tương tự được thực hiện ở trước của bộ thu. Số hóa các tín hiệu vô tuyến tần số cao đòi hỏi các bộ chuyển đổi tương tự sang số và số sang tương tự tốc độ cao. Các hệ thống RoF tương tự đã được nghiên cứu cho các ứng dụng radar và mở rộng vùng phủ sóng mạng gia đình. Các kiến trúc dựa trên Điều chế Modulation-Direct Detection (IM-DD)



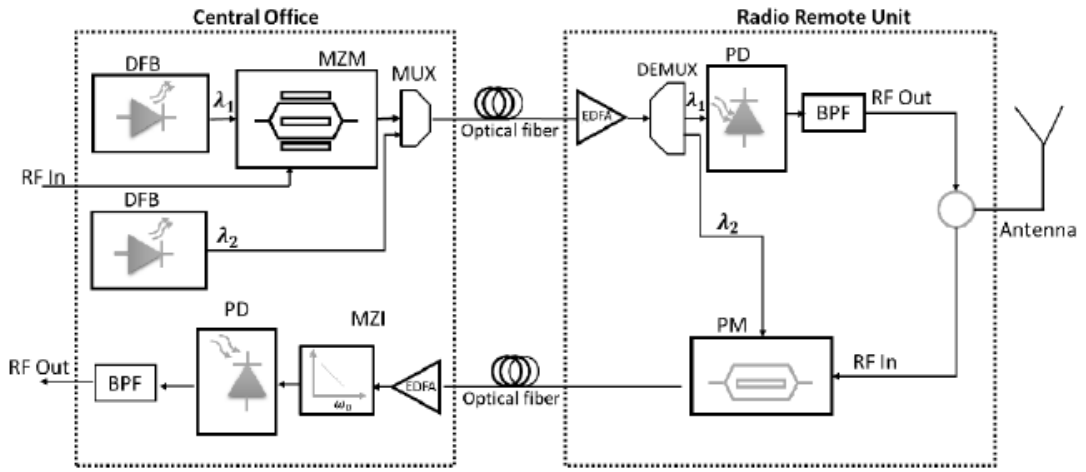
trong đó tín hiệu RF điều chế sóng mang bằng cách điều chế laser trực tiếp hoặc điều chế ngoài bằng bộ điều chế Mach-Zehnder. Một giải pháp khác là các liên kết RoF điều chế theo pha/tần số nhưng nó yêu cầu một bộ giải tần để phát hiện trực tiếp hoặc phát hiện kết hợp. Yêu cầu này làm cho bộ thu phát vô tuyến (RRU) trở nên nhạy hơn hoặc phức tạp hơn. Nhưng mục tiêu thiết kế cho các mạng truyền tải 5G là cung cấp hiệu suất cao của việc truyền tín hiệu liên quan đến mức tiêu thụ điện năng và độ phức tạp thấp. Trong phần này sẽ trình bày về kiến trúc RoF điều chế pha và phát hiện trực tiếp (Phase-Modulation and Direct Detection: PM-DD) chỉ dành cho kênh đường lên kết hợp với phân phối bước sóng quang từ trạm phân đoạn.

#### 1.6.3.1. Mô tả kiến trúc mạng

IM-DD là kỹ thuật đơn giản và thông thường nhất để truyền tín hiệu RF qua cáp quang. Trong sơ đồ điều chế trực tiếp, diode laser điều chế trực tiếp bằng tín hiệu RF. Kỹ thuật này yêu cầu laser có băng thông rộng vì tín hiệu tần số cao bị ảnh hưởng bởi tán sắc sợi quang và chirp của laser. Điều chế ngoài bằng cách sử dụng bộ điều chế Mach-Zehnder (MZM) để tránh hiệu ứng chirp và một số kỹ thuật khác được sử dụng để khắc phục ảnh hưởng của tán sắc. Các liên kết dựa trên MZM RoF được ưu tiên cho các ứng dụng từ xa. Trong kiến trúc PM-DD, pha của sóng mang được điều chế bởi tín hiệu RF. Liên kết này cũng bị tán sắc và cần một bộ lọc quang để phát hiện trực tiếp. Tuy nhiên, liên kết PM-DD có thể cung cấp độ méo thấp hơn và tuyến tính cao hơn so với liên kết IM-DD. Ngoài ra, kỹ thuật PM-DD không cần làm lệch bộ điều biến pha. Điều này có lợi đối với nhiều RRU trong mạng 5G nơi cần tiêu thụ điện ít và đơn giản. Việc chuyển đổi điều chế pha thành điều chế biên độ có thể được thực hiện bằng Giao thoa kế Mach-Zehnder (MZI). Kiến trúc RoF được biểu thị trong Hình 1.12, trong đó liên kết RoF dựa trên MZM được sử dụng cho đường xuống và liên kết RoF dựa trên điều chế pha được sử dụng cho đường lên.

Trạm trung tâm (CO) tích hợp laser chế độ kép, bộ ghép kênh quang, sợi quang, MZI, photodiode và bộ lọc điện. Bước sóng  $\lambda_2$  được phân phối cho RRU để điều chế đường lên. Bộ thu phát RRU tích hợp bộ tách sóng quang, photodiode, bộ điều biến pha, bộ khuếch đại nhiễu thấp, bộ chuyển pha điện và ăng ten. Do đó, ở các RRU không có nguồn laser.



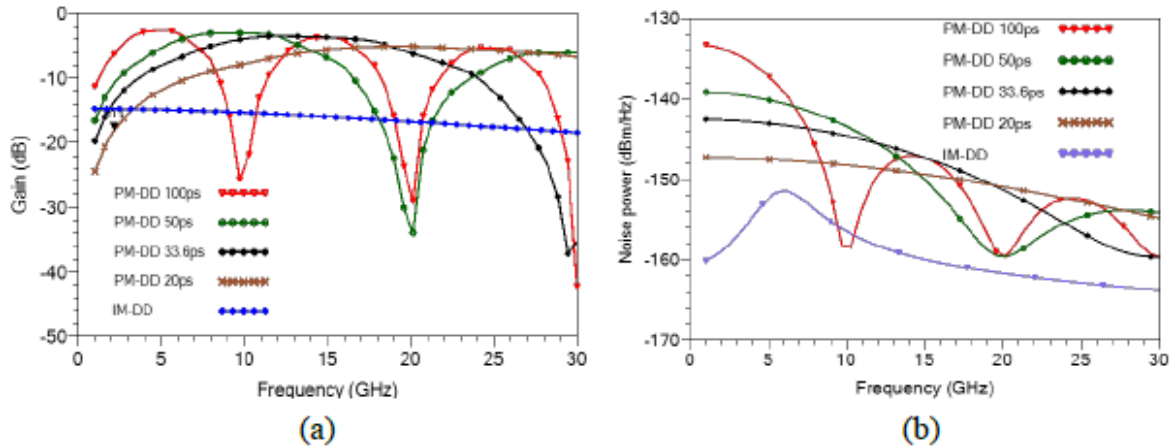


Hình 1. 12. Kiến trúc RoF cho mạng truyền tải 5G

### 1.6.3.2. Hiệu suất của liên kết RoF PM-DD

Hệ thống RoF được coi là một hệ thống tương tự liên quan đến tín hiệu RF đầu vào và đầu ra. Để đánh giá hiệu suất tương tự của liên kết như vậy, các thành phần quang điện tử và quang được mô hình hóa bằng các mạch điện tương đương để tận dụng các công cụ mô phỏng có sẵn và phù hợp của phần mềm được sử dụng.

Hình 1.13 biểu diễn độ lợi và mật độ phổ công suất nhiễu của các liên kết PM-DD và IM-DD.

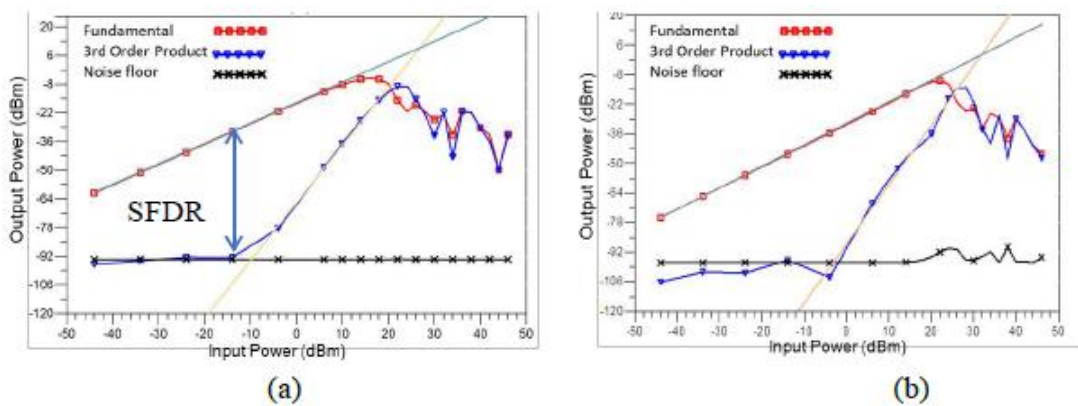


Hình 1. 13. Liên kết PM-DD và IM-DD (a) độ lợi và (b) công suất nhiễu.<sup>[5]</sup>

Chúng thu được khi cho cùng một công suất quang vào bộ điều biến và các giá trị  $V\pi$  (điện áp nửa sóng) bằng nhau. Nó cho thấy sự phụ thuộc mạnh vào thời gian trễ  $\tau$  của MZI đối với trường hợp liên kết PM-DD. Độ lợi tối đa ở tần số RF là bội số của  $FSR / 2$ , trong đó  $FSR = 1 / \tau$  là dải phổ tự do. Đối với tần số 5 GHz, mức tăng liên kết tối đa -2,6 dB đạt được với liên kết PM-DD cho  $FSR \tau = 100$  ps trong khi chỉ thu được -15 dB với liên kết IM-DD. Tuy nhiên, tổng công suất nhiễu cao hơn đối với liên kết PM-DD do nhiễu pha quang trở thành nhiễu cường độ gây ra bởi bộ giải tần.

Hình 1.14 cho thấy công suất đầu ra liên kết RoF của tín hiệu cơ bản và bậc ba so với công suất đầu vào ở tần số 5 GHz. Spurious Free Dynamic Range (SFDR) được xác định từ các kết quả thu được và mức nhiễu. Bảng 1.1 tóm tắt một số đặc điểm tương tự của hai liên kết với tần số 2 và 5 GHz. Như trong bảng, hiệu suất thu được với liên kết IM-DD tốt hơn vì trong liên kết PM-DD chuyển đổi độ ồn cao. Do đó, sử dụng một laser với băng thông hẹp hơn có thể tăng hiệu suất.

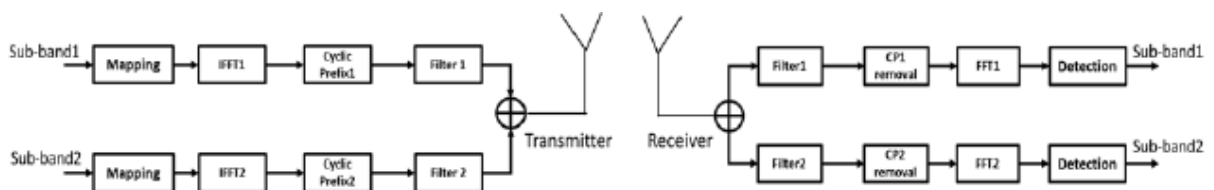
Tuy nhiên, hiệu suất PM-DD cho các ứng dụng RoF là khả quan và có thể là một lựa chọn tốt cho đường lên. Hạn chế duy nhất là ảnh hưởng của nhiễu pha laser và cần phải có bộ giải tần. Bộ lọc quang và laser hiệu suất cao có thể được sử dụng tại CO vì chúng được dùng chung.



Hình 1. 14. Dải động của liên kết (a) IM-DD và (b) PM-DD ( $\tau = 100$  ps) với  $f_{RF} = 5$  GHz.<sup>[5]</sup>

### 1.6.3.3. Truyền dẫn tín hiệu F-OFDM qua liên kết PM-DD

Nhiều dạng sóng đã được đề xuất cho truy cập vô tuyến 5G trong tương lai. Hầu hết trong số chúng là Cyclic Prefix -OFDM (CP-OFDM) hoặc trường hợp đặc biệt của OFDM là FBMC. OFDM có nhiều ưu điểm và đã được nghiên cứu rộng rãi cho mục đích truy cập vô tuyến 5G. Sự lựa chọn của 3GPP cuối cùng là các kỹ thuật CP-OFDM. Filtered-OFDM (F-OFDM) là biến thể CP-OFDM là ứng cử viên tiềm năng cho mạng 5G trong tương lai.



### *Hình 1. 15. Sơ đồ điều chế/giải điều chế F-OFDM*

Hiệu suất liên kết PM-DD không bị ảnh hưởng bởi suy hao quang vì nhiều chủ yếu là do quá trình chuyển đổi nhiều pha.

Hệ thống vô tuyến qua cáp quang dựa trên kỹ thuật IM-DD cho đường xuống và kỹ thuật PM-DD cho đường lên được đề xuất cho việc truyền tín hiệu không dây 5G.<sup>[5]</sup>

#### **1.7. Kết luận chương 1**

Trong chương này đã trình bày các khái niệm, thành phần cơ bản và các kỹ thuật truyền sóng vô tuyến qua sợi quang. Tìm hiểu các ứng dụng của RoF trong mạng LAN không dây, mạng thông tin giao thông (RVC), mạng vô tuyến tế bào. Đồng thời chương này cũng trình bày về RoF ứng dụng cho mạng 5G trong tương lai sử dụng các kỹ thuật IM-DD và PM-DD.

## CHƯƠNG 2: PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG CỦA HIỆU ỨNG PHI TUYẾN TRONG RoF

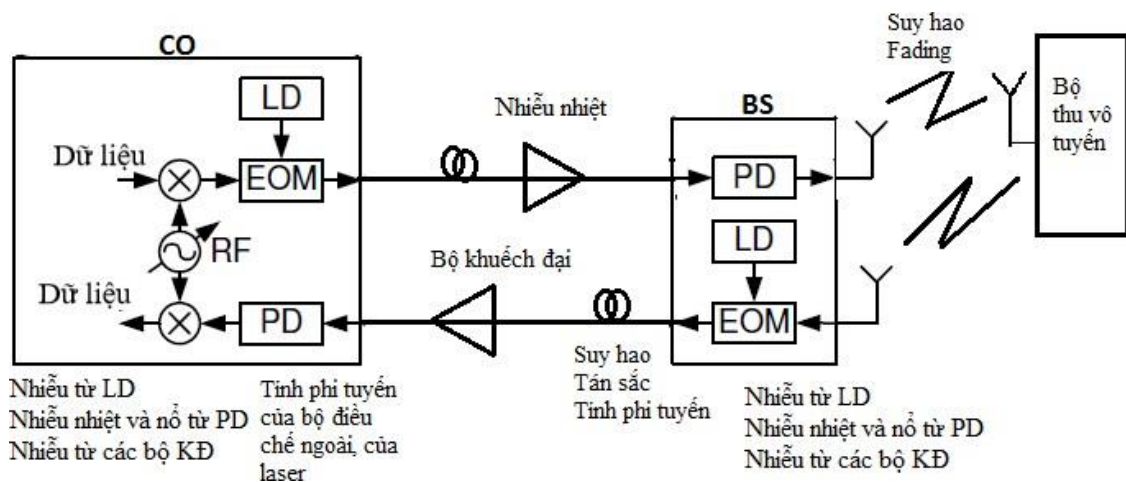
Chương này sẽ nghiên cứu các ảnh hưởng của các tham số trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến lên hiệu năng hệ thống MMW-RoF. Đặc biệt, đối với hiện tượng phi tuyến có thể bỏ qua đối với các hệ thống thông tin quang hoạt động ở mức công suất vừa phải (vài mW) với tốc độ bit lên đến 2.5 Gbps. Tuy nhiên, ở tốc độ bit cao hơn như 10 Gb/s hay ở mức công suất truyền dẫn lớn nên việc xét các hiệu ứng phi tuyến rất quan trọng. Méo phi tuyến gây ra bởi bộ thu phát trong hệ thống MMW-RoF bao gồm méo phi tuyến gây ra bởi nguồn quang trong điều chế trực tiếp, méo phi tuyến gây ra bởi bộ điều chế ngoài (MZM) và méo phi tuyến gây ra bởi bộ tách sóng quang.

### 2.1. Giới thiệu

Hệ thống MMW-RoF là một hệ thống truyền thông lai ghép giữa thông tin sợi quang và thông tin vô tuyến, do vậy nó chịu ảnh hưởng của cả hai môi trường này. Có thể thấy rằng hiệu năng của hệ thống MMW-RoF chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố khác nhau trong cả phân hệ quang và phân hệ vô tuyến, gồm các nguồn nhiễu sinh ra từ các bộ thu phát, méo phi tuyến trên sợi quang cũng như trên phần tử thu phát, tán sắc sợi quang, suy hao và fading kênh vô tuyến. Sự ảnh hưởng của từng yếu tố là khác nhau trong từng điều kiện truyền dẫn cụ thể.

### 2.2. Các tham số bộ thu phát

#### 2.2.1. Các nguồn nhiễu



Hình 2. 1. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống MMW-RoF

Các nguồn nhiễu trong các hệ thống thông tin quang bao gồm nhiễu cường độ tương đối RIN (Relative Intensity Noise) của Laser, nhiễu pha của laser, nhiễu nhiễu của

PD (Photo Diode) và nhiễu nhiệt của bộ khuếch đại và bộ thu. Công suất nhiễu RIN được tính như sau:

$$\begin{aligned}\sigma_{RIN}^2 &= (RIN_{Lasers} + RIN_{phase}) \cdot I_{av}^2 \cdot B_n \\ &= K_{RIN} \cdot I_{av}^2 \cdot B_n\end{aligned}\quad (2.1)$$

trong đó  $RIN_{Lasers}$ , là nhiễu cường độ tương đối từ các laser,  $RIN_{phase}$  là nhiễu biến đổi từ nhiễu pha sang nhiễu cường độ,  $I_{av}$  là dòng quang điện trung bình và  $B_n$  là băng tần nhiễu hiệu dụng của bộ thu.  $K_{RIN}$  là giá trị phụ thuộc vào thiết bị, được tính bằng dB/Hz (thường nhận giá trị khoảng -150dB/Hz).

Nhiễu tại bộ thu quang (tại BS cho đường xuống hoặc CO cho đường lên) gây ra bao gồm nhiễu nỏ, nhiễu dòng tối PD và nhiễu nhiệt. Công suất nhiễu nỏ được xác định bởi:

$$\sigma_{short}^2 = 2qI_{av}B_n \quad (2.2)$$

trong đó,  $q$  là điện tích electron.

Vì dòng tối ( $I_d$ ) cũng tạo ra nhiễu nỏ, nên nhiễu nỏ tổng sẽ được tính như sau:

$$\sigma_{short}^2 = 2q(I_{av} + I_d)B_n \quad (2.3)$$

Nhiễu nhiệt là nhiễu sinh ra do sự chuyển động nhiệt ngẫu nhiên của các điện tử bên trong điện trở tải gây nên sự thăng giáng về dòng. Công suất nhiễu nhiệt được mô tả bởi công thức sau:

$$\sigma_{th}^2 = 4K_BTB_n / R_L \quad (2.4)$$

trong đó,  $B_n$  là hằng số Boltzmann,  $T$  là nhiệt độ Kelvin và  $R_L$  là điện trở tải tại đầu ra PD.

### 2.2.2. Méo phi tuyến

Méo phi tuyến gây ra bởi bộ thu phát trong hệ thống MMW-RoF bao gồm méo phi tuyến gây ra bởi nguồn quang trong điều chế trực tiếp, méo phi tuyến gây ra bởi bộ điều chế ngoài (MZM) và méo phi tuyến gây ra bởi bộ tách sóng quang. Do đặc tính điều chế của LD chỉ tuyến tính trong một khoảng nhất định, khi đưa tín hiệu RF vào điều chế trực tiếp nguồn LD sẽ làm cho tín hiệu bị méo nếu không lựa chọn điểm làm việc cẩn thận để đảm bảo nguồn quang làm việc ở vùng tuyến tính.

Trong điều chế ngoài, bộ điều chế MZM được sử dụng để điều chế tín hiệu dữ liệu vào sóng mang quang từ LD. Khi đó LD chỉ phát ánh sáng liên tục nên không gây ra hiệu ứng phi tuyến, ảnh hưởng phi tuyến lại là do đặc tính phi tuyến của bộ MZM.

Tại các bộ tách sóng quang, tín hiệu được tách sóng theo luật bình phương, vì thế, các thành phần không mong muốn sẽ xuất hiện tại đầu ra bộ tách sóng. Một trong các thành phần không mong muốn ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống đó là thành phần phi tuyến bậc hai, đây chính là đặc trưng cho nhiễu phi tuyến gây ra bởi bộ tách sóng quang.

### 2.2.3. Các tham số khác

Các tham số khác ảnh hưởng đến chất lượng hệ thống và đã được khảo sát trong luận án gồm chỉ số điều chế của bộ điều chế MZM và hệ số khuếch đại của bộ thu APD.

Chỉ số điều chế của bộ điều chế MZM cũng là một tham số gây méo tín hiệu do đó làm suy giảm hiệu năng hệ thống. Khi chỉ số điều chế quá thấp thì hiệu quả điều chế không cao. Do có cơ chế khuếch đại dòng nên hệ số khuếch đại của APD tăng  $M_A$  lần so với đáp ứng của PD. Tùy thuộc vào vật liệu chế tạo APD khác nhau mà dải giá trị của  $M_A$  sẽ nhận các giá trị khác nhau (ví dụ  $M_A = 10-40$  với vật liệu sử dụng là InGaAs).

## 2.3. Các tham số của kênh quang

Khi sóng vô tuyến được truyền trên sợi quang, nó cũng sẽ chịu các ảnh hưởng của sợi quang như suy hao, tán sắc, hay các hiệu ứng phi tuyến. Tuy nhiên, đối với các hệ thống khác nhau thì mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này cũng khác nhau. Đối với các hệ thống MMW-RoF có tốc độ cao và cự ly thường tương đối lớn, yếu tố chủ yếu ảnh hưởng lên hiệu năng hệ thống là suy hao và tán sắc.

### 2.3.1. Suy hao sợi quang

Công suất tín hiệu sẽ bị suy giảm khi truyền qua sợi quang do tín hiệu bị hấp thụ, tán xạ, hay do uốn cong. Suy hao do hấp thụ trong sợi quang gồm hai loại đó là suy hao do hấp thụ của vật liệu chế tạo sợi và suy hao do hấp thụ của các tạp chất còn sót lại trong sợi. Suy hao do tán xạ Rayleigh sinh ra từ sự thăng giáng về mật độ mức vi mô và sự thăng giáng về thành phần trong thủy tinh do có sự pha tạp để thay đổi chiết suất thủy tinh. Những thăng giáng này đều dẫn đến sự biến đổi ngẫu nhiên về chiết suất ở cỡ nhỏ hơn bước sóng và trở thành các tâm tán xạ. Các biến đổi chiết suất

này gây ra tán xạ ánh sáng gọi là tán xạ Rayleigh. Suy hao do uốn cong xảy ra trong quá trình lắp đặt sợi quang.

Nếu  $P(0)$  là công suất quang đi vào trong sợi (tại  $y = 0$ ) thì công suất  $P(y)$  tại khoảng cách  $y$  sẽ giảm xuống còn:

$$P(y) = P(0)\exp(-\alpha y) \quad (2.5)$$

trong đó,  $\alpha$  là hệ số suy hao của sợi quang có đơn vị là dB/km, thường có giá trị là 0,2 dB/km.

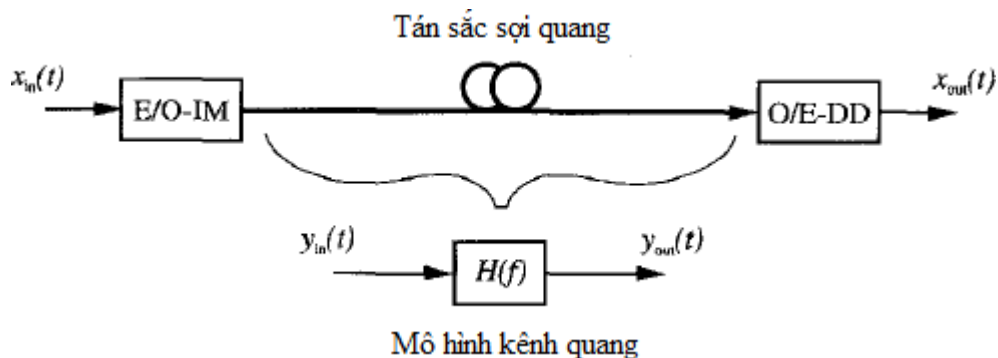
### 2.3.2. Tán sắc sợi quang

Đối với các hệ thống MMW-RoF, các sợi quang đơn mode thường được sử dụng. Do đó, loại tán sắc ảnh hưởng đến hiệu năng hệ thống là tán sắc sắc thể (tán sắc vận tốc nhóm). Ảnh hưởng của tán sắc này đến hiệu năng hệ thống còn phụ thuộc vào các sơ đồ tách sóng của hệ thống, gồm sơ đồ tách sóng trực tiếp (Direct Detection - DD) và trộn sóng (tạo phách) từ xa (remote heterodyne detection - RHD).

Đối với sơ đồ tách sóng trực tiếp DD, tán sắc gây ra sự suy giảm hiệu năng hệ thống do méo pha của hai băng điều chế so với sóng mang của tín hiệu quang. Trong sơ đồ tách sóng RHD, tán sắc làm suy giảm hiệu năng hệ thống do méo pha và nhiễu pha do sự không tương quan của hai sóng mang quang được truyền đi. Hơn nữa, hai sóng mang quang thường truyền trên hai tuyến đường khác biệt trước khi chúng được kết hợp trên một sợi quang. Điều này cũng tạo ra sự không tương quan nếu hai tuyến đường đó không được cân bằng tuyệt đối. Dưới đây, ảnh hưởng của tán sắc lên từng sơ đồ tách sóng sẽ được xem xét chi tiết.

#### a. Ảnh hưởng của tán sắc trong mô hình sử dụng tách sóng trực tiếp DD

Tán sắc sắc thể có ảnh hưởng nghiêm trọng đến khoảng cách truyền dẫn của hệ thống MMW-RoF sử dụng mô hình điều chế cường độ tách sóng trực tiếp (Intensity Modulation - Direct Detection - IM-DD). Mô hình hệ thống IM-DD được mô tả như trong hình 2.1





## Hình 2. 2. Hệ thống IM-DD

Tín hiệu vô tuyến ở băng tần milimet  $x_{in}(t)$  được điều chế vào sóng mang quang bằng bộ điều chế cường độ. Tín hiệu quang đầu ra  $y_{in}(t)$  được truyền qua sợi quang tới bộ tách sóng. Tại bộ tách sóng, tín hiệu quang thu được  $y_{out}(t)$  được tách sóng trực tiếp và tạo thành tín hiệu  $x_{out}(t)$ . Nếu môi trường truyền dẫn là lý tưởng thì  $x_{in}(t)$  bằng  $x_{out}(t)$ . Tuy nhiên, do suy hao, đặc tính phi tuyến của các bộ điều chế và tách sóng, và do tán sắc sợi quang, hai tín hiệu này không thể bằng nhau.

Trong hệ thống IM-DD, tín hiệu ở băng tần milimet được mang ở hai băng trên và dưới của sóng mang quang. Do ảnh hưởng của tán sắc và độ lệch tần số lớn giữa hai băng và sóng mang quang, pha của mỗi thành phần phổ của tín hiệu quang được truyền,  $y_{in}(t)$ , sẽ có sự thay đổi khác nhau. Sau quá trình tách sóng, sự sai khác pha đó sẽ dẫn đến suy giảm công suất của tín hiệu ở băng milimet khôi phục được,  $x_{out}(t)$ , và do đó làm giảm hiệu năng hệ thống (giảm tỉ số sóng mang trên nhiễu C/N).

Để đánh giá sự suy giảm hiệu năng do tán sắc sợi quang, sợi quang được mô hình hóa như một bộ lọc thông dải (như trong hình 2.1) có hàm truyền đạt  $H(f)$  và dưới ảnh hưởng của tán sắc, sự suy giảm tỉ số C/N ( $\Delta C/N$ ) được tính như sau:

$$\Delta C/N = 10 \log \left| \frac{X'_{out}(f_{mm})}{X_{out}(f_{mm})} \right|^2 \quad (2.6)$$

trong đó  $X'_{out}(f_{mm})$  là công suất tín hiệu nhận được khi không tính đến ảnh hưởng của tán sắc sợi quang,  $X_{out}(f_{mm})$  là công suất tín hiệu nhận được khi tính đến ảnh hưởng của tán sắc sợi quang và  $f_{mm}$  là tần số sóng milimet.

### **b. Ảnh hưởng của tán sắc đến mô hình tách sóng tạo phách từ xa**

Hệ thống MMW-RoF sử dụng tách sóng RHD được dựa trên quá trình truyền dẫn đồng thời hai sóng mang quang có pha tương quan trên cùng sợi quang. Hai tín hiệu quang này có tần số tương ứng là  $f_1$  và  $f_2$ , có độ lệch tần số là tần số sóng milimet mong muốn  $f_{mm} = |f_2 - f_1|$ . Sơ đồ nguyên lý chung cho hệ thống MMW-RoF sử dụng tách sóng RHD được thể hiện trên hình 2.2. Hai tín hiệu quang được truyền dẫn trong sợi quang là cùng pha. Nếu môi trường truyền dẫn hoàn hảo, không có ảnh hưởng của sợi quang hay các thiết bị quang khác, hai sóng quang này vẫn có sự tương

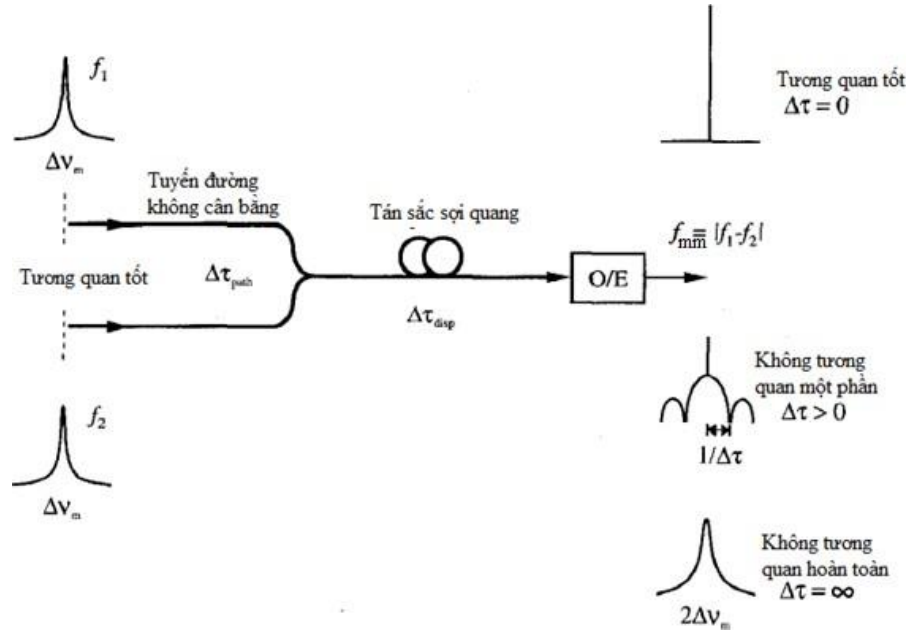


quan về pha tại bộ tách sóng tạo phách từ xa. Kết quả là, tín hiệu tạo ra sẽ ở tần số  $f_{mm}$

Tuy nhiên, do ảnh hưởng của tán sắc, hai sóng mang quang sẽ có sự khác biệt về trễ truyền dẫn,  $\Delta\tau_{disp}$ , khi chúng được truyền qua sợi quang. Hơn nữa, nếu hai tín hiệu quang này trước khi được kết hợp truyền trên cùng sợi quang, truyền trên các tuyến đường tách biệt, không được cân bằng, thì chúng sẽ chịu ảnh hưởng của trễ lan truyền sai khác của tuyến đường,  $\Delta\tau_{path}$ . Như vậy, tổng sai khác trễ truyền dẫn được tính như sau:

$$\Delta\tau = (\Delta\tau_{path} + \Delta\tau_{disp}) \quad (2.7)$$

Sự sai khác này tạo ra sự không tương quan về pha một phần hay toàn phần như chỉ ra trong hình 2.2.



Hình 2. 3. Nguyên lý của hệ thống MMW-RoF sử dụng tách sóng tạo phách từ xa

Thành phần trễ sai khác gây ra do tán sắc phụ thuộc vào chiều dài sợi quang  $L$ , bước sóng quang, độ lệch tần số của hai tín hiệu quang và hệ số tán sắc sợi quang, được biểu diễn bằng biểu thức:

$$\Delta\tau_{disp} = D.L.\frac{\lambda^2}{c}.f_{mm} \quad (2.8)$$

Phần trễ sai khác do hai tín hiệu quang được đi trên hai tuyến đường khác nhau trước khi được ghép chung trên một sợi quang, được xác định bởi:

$$\Delta\tau_{path} = \pm \frac{\Delta L_{path}.n}{c} \quad (2.9)$$

trong đó,  $\Delta L_{path}$  là sự sai khác tuyến đường và  $n$  là chỉ số chiết suất của vật liệu. Dấu cộng trừ thể hiện ảnh hưởng này cùng chiều hay ngược chiều với trễ do tán sắc. Tổng trễ này sẽ gây ra nhiễu pha lên tín hiệu milimet, có công suất như sau:

$$\sigma_{CD}^2 = \int_0^B \frac{2\Delta\nu_m}{\pi f^2} \cdot \{1 - \cos(2\pi f \Delta\tau)\} df \quad \text{với } B_n \leq \frac{1}{\Delta\tau} \quad (2.10)$$

$$\approx 2\pi\Delta\nu_m B_n (\Delta\tau)^2$$

trong đó,  $\Delta\nu_m$  là độ rộng phổ toàn phần tại nửa cực đại của laser. Ngoài ra, trễ sai khác này còn gây ra sự suy giảm về hiệu năng (tỉ số C/N), được xác định như sau:

$$\Delta C / N = 10 \log \frac{1}{\exp(-2\pi\Delta\nu_m \Delta\tau)} \quad (2.11)$$

## 2.4. Các tham số kênh vô tuyến

Khi tín hiệu được phát đi qua kênh truyền vô tuyến, bị che chắn bởi các tòa nhà, núi non, cây cối ..., tín hiệu bị phản xạ, tán xạ, nhiễu xạ... và phía thu sẽ nhận được nhiều phiên bản khác nhau của tín hiệu theo nhiều đường khác nhau. Hiện tượng này được gọi chung là fading do truyền dẫn đa đường.

Hiện tượng fading trong kênh vô tuyến có thể được phân thành hai loại: fading phạm vi hẹp (small-scale fading) và fading phạm vi rộng (large-scale fading) hay suy hao. Fading phạm vi rộng thể hiện sự suy giảm công suất trung bình tín hiệu hoặc suy hao kênh truyền do sự di chuyển trong một vùng rộng, hay khoảng cách giữa anten phát và anten thu là tương đối lớn. Các thống kê về hiện tượng fading phạm vi rộng cho phép ta ước lượng độ suy hao kênh truyền theo hàm của khoảng cách. Fading phạm vi hẹp thể hiện sự thay đổi đáng kể ở biên độ và pha tín hiệu. Điều này xảy ra là do sự thay đổi nhỏ trong vị trí không gian (nhỏ khoảng nửa bước sóng) giữa anten phát và anten thu.

### 2.4.1. Fading phạm vi rộng và suy hao trong kênh vô tuyến

Fading phạm vi rộng chính là sự biến thiên về biên độ trung bình hay công suất trung bình của tín hiệu nhận được khi môi trường truyền dẫn là kênh đa đường. Khi khoảng cách giữa anten phát và anten thu khá lớn và tăng dần, tín hiệu nhận được sẽ giảm dần và được mô hình theo kênh suy hao phạm vi rộng, có suy hao tổng là  $P_L$  được xác định bởi:

$$P_{L[dB]} = P_{Tx[dBm]} + G_{Tx[dBi]} + G_{Rx[dBi]} - P_{Rx[dBm]} \quad (2.12)$$

trong đó,  $P_{Tx}$  là công suất phát tại anten phát có hệ số khuếch đại  $G_{Tx}$ ,  $P_{Rx}$  là công suất thu được tại anten thu có hệ số khuếch đại  $G_{Rx}$ . Do đó, công suất tín hiệu nhận được được tính theo công thức:

$$P_{Rx[dBm]} = P_{Tx[dBm]} + G_{Tx[dBi]} + G_{Rx[dBi]} - P_L[dB] \quad (2.13)$$

Trong các hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng sóng microwave, suy hao truyền dẫn chủ yếu là do suy hao môi trường tự do (free space loss) gây ra. Tuy nhiên, trong các hệ thống sử dụng băng sóng MMW, suy hao truyền dẫn còn do rất nhiều các yếu tố khác như suy hao do các phân tử khí như oxy, hơi nước và do mây mưa gây ra. Do vậy, tổng suy hao trong kênh truyền sóng MMW được tính bởi:

$$P_L = P_{fs} + P_{at} + P_{rain} = 20 \log \frac{4\pi df_{mm}}{c} + (\gamma_{ox} + \gamma_{wv} + \gamma_{rain})d \quad (2.14)$$

trong đó  $P_{fs}$  là suy hao không gian tự do,  $P_{at}$  là suy hao do sự hấp thụ của khí quyển bao gồm sự hấp thụ của oxy,  $P_{rain}$  hơi nước và là suy hao do mưa. Tiếp theo,  $d$  là khoảng cách vô tuyến,  $f_{mm}$  là tần số sóng mang MMW,  $c$  là tốc độ ánh sáng trong chân không và  $\gamma_{ox}$ ,  $\gamma_{wv}$ ,  $\gamma_{rain}$  là các hệ số suy hao gây ra bởi phân tử oxy, hơi nước và do mưa.

Sự hấp thụ của oxy phụ thuộc vào khoảng cách kênh vô tuyến và tần số và mạnh nhất tại tần số 60GHz. Hệ số hấp thụ của oxy được xác định theo công thức:

$$\gamma_{ox[dB/km]}(f_{[GHz]}) = \begin{cases} 15,1 - 0,104 \times (f - 60)^{3,26} & 60 \leq f \leq 63 \\ 11,35 + (f - 63)^{2,25} - 5,33 \times (f - 63)^{1,27} & 63 \leq f \leq 66 \end{cases} \quad (2.15)$$

Hệ số suy hao do hấp thụ của hơi nước tại nhiệt độ bề mặt 200C, tần số nhỏ hơn hoặc bằng 350GHz được xác định như sau:

$$\gamma_{wv[dB/km]} = \left[ 0,067 + \frac{2,4}{(f - 22,3)^2 + 6,6} + \frac{7,33}{(f - 183,5)^2 + 5} + \frac{4,4}{(f - 323,8)^2 + 10} \right] \times f^2 \times \rho_{wv} \times 10^{-4} \quad (2.16)$$

trong đó,  $\rho_{wv}$  là mật độ hơi nước, tính bằng  $g / m^3$ .

Với độ ẩm 42% tại 20<sup>0</sup>C, mật độ hơi nước bằng 7,5  $g / m^3$ . Khi đó hệ số hấp thụ của hơi nước tại tần số 60GHz bằng  $\gamma_{wv[dB/km]} = 0,1869$ .

Và suy hao do hấp thụ của các phân tử khí:

$$P_{at} = (\gamma_{ox} + \gamma_{wv})d \quad (2.17)$$

Khi kênh vô tuyến chịu ảnh hưởng của mưa, tín hiệu sẽ bị suy hao dưới tác động của các hạt mưa và phụ thuộc vào tốc độ mưa khác nhau như trong bảng 2.1

*Bảng 2. 1. Hệ số suy hao do mưa.*

Hệ số suy hao do mưa (dB/km) tại các tần số	Tốc độ mưa (mm/h)	
	25	50
60 GHz	10,1	17,9
63 GHz	10,4	18,2
66 GHz	10,6	18,5

#### 2.4.2. Fading phạm vi hẹp

fading phạm vi hẹp trong kênh truyền dẫn đa đường xảy ra do sự chồng chập của các sóng với sự sai pha khác nhau đến từ hướng khác nhau bởi sự phản xạ, khúc xạ, tán xạ từ các tòa nhà, cây cối và các vật thể khác. Kênh đa đường này có thể được mô hình hóa bằng kênh đa đường biến đổi theo thời gian (phổ biến và được sử dụng nhiều nhất), còn được gọi là mô hình kênh có phân bố Rayleigh và mô hình kênh có phân bố Rice. Các mô hình kênh này mô tả sự thăng giáng theo thời gian của biên độ và pha theo các hàm phân bố thống kê.

Mô hình kênh fading có phân bố Rayleigh là mô hình nổi tiếng cho fading phạm vi hẹp, mô tả phân bố đường bao tín hiệu thu được cho các kênh mà không có đường truyền trực tiếp (LOS) nào giữa bên phát và bên thu, nghĩa là tín hiệu thu được qua các đường không trực tiếp (NLOS) giữa bên phát và bên thu.

Trong kênh fading này, tỉ số SNR tức thời trên bit ( $\gamma$ ) là biến ngẫu nhiên với hàm phân bố xác suất (PDF),  $P_{\gamma}(\gamma)$ , được xác định như sau:

$$P_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (2.18)$$

trong đó,  $\bar{\gamma}$  tỉ số SNR trung bình trên bit.

Mô hình kênh fading có phân bố Rice được sử dụng khi có một đường truyền thẳng (LOS) giữa bên phát và bên thu trong kênh truyền dẫn đa đường. Trong trường hợp này, các thành phần đa đường ngẫu nhiên đến bộ thu với những pha khác nhau được xếp chồng lên tín hiệu LOS. Khi thành phần LOS bị suy yếu, tín hiệu tổng hợp có đường bao theo phân bố Rayleigh. Vì vậy, phân bố trở thành phân bố Rayleigh

trong trường hợp thành phần LOS mất đi. Phân bố xác suất của kênh fading này như sau:

$$P_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+K)e^{-K}}{\gamma} \exp\left(-\frac{(1+K)\gamma}{\gamma}\right) \times I_0\left(\sqrt{\frac{K(K+1)\gamma}{\gamma}}\right) \quad (2.19)$$

trong đó,  $K$  là hệ số Rice,  $I_0$  là hàm Bessel sửa đổi bậc 0 loại 1.

## 2.5. Hiệu ứng phi tuyến sợi quang

Hiệu ứng phi tuyến sợi quang xuất hiện khi tốc độ dữ liệu, chiều dài truyền dẫn, số bước sóng và công suất quang tăng lên. Các hiệu ứng phi tuyến này đã có ảnh hưởng trực tiếp tới chất lượng truyền dẫn của hệ thống và thậm chí trở nên quan trọng hơn vì sự phát triển của bộ khuếch đại quang sợi EDFA cùng với sự phát triển của các hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM. Với việc tăng hiệu quả truyền thông tin mà có thể được làm bằng việc tăng tốc độ bit, giảm khoảng cách giữa các kênh hoặc kết hợp cả hai phương pháp trên, các ảnh hưởng của phi tuyến sợi trở nên đóng vai trò quyết định hơn.

Hiệu ứng quang được coi là hiệu ứng phi tuyến nếu các tham số của nó phụ thuộc vào cường độ ánh sáng (công suất). Các hiện tượng phi tuyến có thể bỏ qua đối với các hệ thống thông tin quang hoạt động ở mức công suất vừa phải (vài mW) với tốc độ bit lên đến 2.5 Gbps. Tuy nhiên, ở tốc độ bit cao hơn như 10 Gbps hay ở mức công suất truyền dẫn lớn, việc xét các hiệu ứng phi tuyến rất quan trọng. Trong các hệ thống WDM, các hiệu ứng phi tuyến có thể trở nên quan trọng thậm chí ở công suất và tốc độ bit vừa phải.

Các hiệu ứng phi tuyến có thể chia ra làm hai loại. Loại thứ nhất phát sinh do tác động qua lại giữa các sóng ánh sáng với các phonon (rung động phân tử) trong môi trường silica-một trong nhiều loại hiệu ứng tán xạ (như hiệu ứng tán xạ Rayleigh). Hiệu ứng chính trong loại này là tán xạ do kích thích Brillouin (SBS - Stimulated Brillouin-Scattering) và tán xạ do kích thích Raman (SRS - Stimulated Raman-Scattering).

Loại thứ hai sinh ra do sự phụ thuộc của chiết suất vào cường độ điện trường hoạt động, tỉ lệ với bình phương biên độ điện trường. Các hiệu ứng phi tuyến quan trọng trong loại này là hiệu ứng tự điều pha (SPM – Self-Phase Modulation), hiệu ứng điều chế xuyên pha (CPM – Cross-Phase Modulation) và hiệu ứng trộn bốn bước sóng (FWM – Four-Wave Mixing). Loại hiệu ứng này được gọi là hiệu ứng Kerr.

### 2.5.1. Nguyên nhân gây ra hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang

Hiệu ứng phi tuyến xuất hiện khi công suất quang phát trên đường truyền tăng dần đến mức nào đó. Nguyên nhân là do 2 yếu tố:

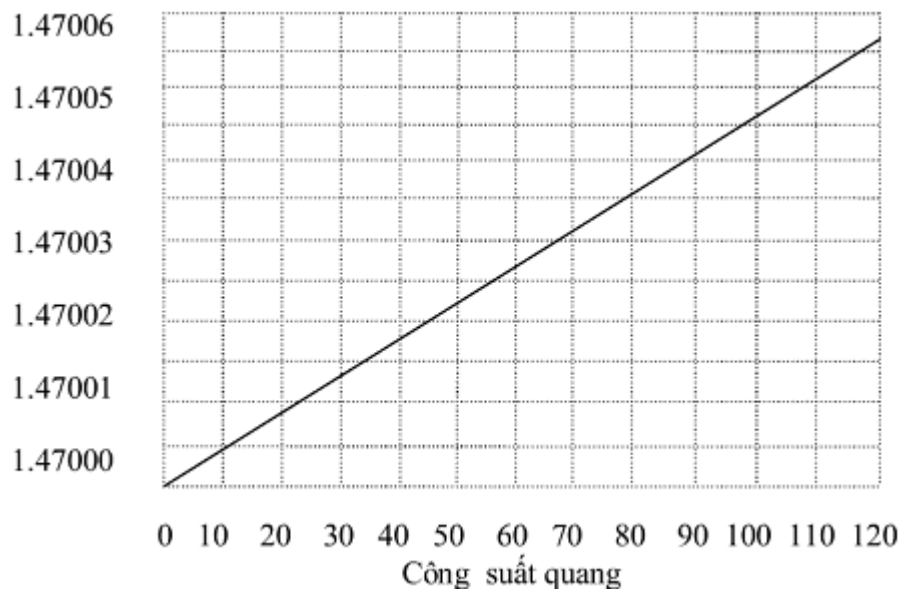
**Thứ nhất là sự phụ thuộc của chỉ số chiết suất  $n$  vào công suất ánh sáng:**

$$n = n_0 + n_2 \frac{P_0}{A_{eff}} \quad (2.20)$$

Trong đó:

$n_0$  là chỉ số chiết suất tuyến tính (chỉ số chiết suất trong môi trường tuyến tính cường độ thấp).

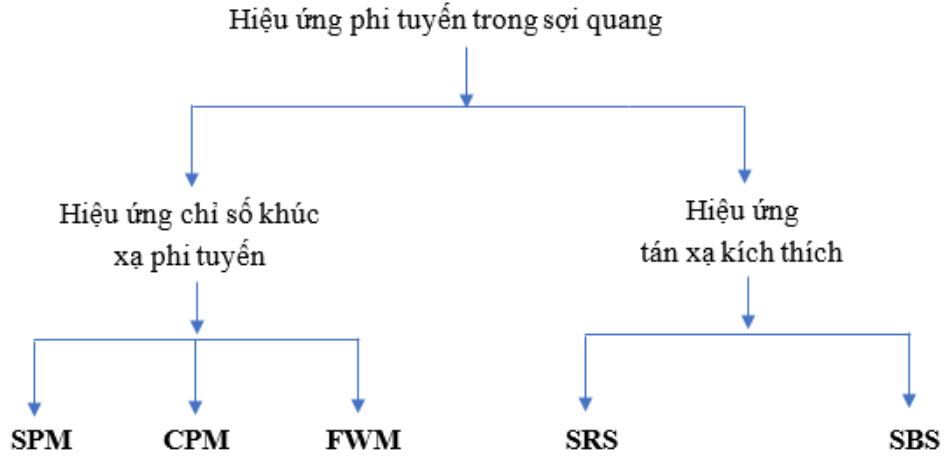
$n_2$  là chỉ số chiết suất phi tuyến. Giá trị điển hình của  $n_2$  trong thủy tinh silic là  $3,2 \cdot 10^{-20} m^2/W$  và không phụ thuộc vào bước sóng.



Hình 2. 4. Sự phụ thuộc của chiết suất sợi silic vào công suất quang

Ta nhận thấy sự thay đổi chiết suất tương đối nhỏ song nó lại rất quan trọng vì chiều dài tương tác trong sợi quang thực tế có thể lên tới hàng trăm kilomet và sự biến đổi này gây ra các hiệu ứng XPM, SPM, FWM.

**Thứ hai là do hiện tượng tán xạ kích thích như : SRS, SBS.**



Hình 2. 5. Hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang

### 2.5.2. Hiệu ứng liên quan đến chỉ số khúc xạ phi tuyến

#### **Hiệu ứng tự điều pha (SPM – Self-Phase Modulation)**

Sự phụ thuộc của chỉ số chiết suất  $n$  vào cường độ trường của sóng ánh sáng được gọi là hiệu ứng Kerr quang, trong đó toàn bộ các trường tham gia vào tương tác phi tuyến ở cùng một tần số. Chỉ số chiết suất biến đổi như sau:

$$n'_j = n_j + \overline{n_2} \cdot \frac{P}{A_{eff}} \quad \text{với } j=1,2,\dots \quad (2.21)$$

Trong đó :

$n'_1, n'_2$  là chiết suất lõi và vỏ.

$\overline{n_2}$  là hệ số chiết suất phi tuyến.

$n_j$  là chỉ số chiết suất tuyến tính

$\overline{n_2} \approx 3 \cdot 10^{-20} m^2/W$  với sợi silic

Hệ số truyền dẫn phi tuyến :

$$\beta' = \frac{n'_j \cdot \omega}{c} = \frac{2\pi n'_j}{\lambda} = \frac{n_j}{\lambda} \cdot 2\pi + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{n_2} \frac{P}{A_{eff}} = \beta + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{n_2} \frac{P}{A_{eff}} = \beta + \bar{\gamma} \cdot P \quad (2.22)$$

Với  $\bar{\gamma} = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{n_2} / A_{eff}$  là hằng số truyền dẫn phi tuyến.

Pha kết hợp với mode sợi quang tăng tuyến tính theo  $z$ , ảnh hưởng của chiết suất phi tuyến dẫn đến một sự dịch pha phi tuyến là :

$$\varphi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L \bar{\gamma} P_{in} e^{-\alpha z} dz = \bar{\gamma} \cdot P_{in} \cdot L_{eff} \quad (2.23)$$

$P_{in}$  giả thiết không đổi. Thực tế sự phụ thuộc của  $P_{in}$  vào thời gian làm cho  $\varphi_{NL}$  thay đổi theo thời gian dẫn đến một sự dịch chuyển tần số mà từng bước ảnh hưởng tới hình dạng xung qua GVD. Để giảm ảnh hưởng của chiết suất phi tuyến thì độ dịch pha

phi tuyến cần thỏa mãn điều kiện  $\phi_{NL} \ll 1$ . Từ đó có thể suy ra điều kiện ngưỡng của công suất quang :

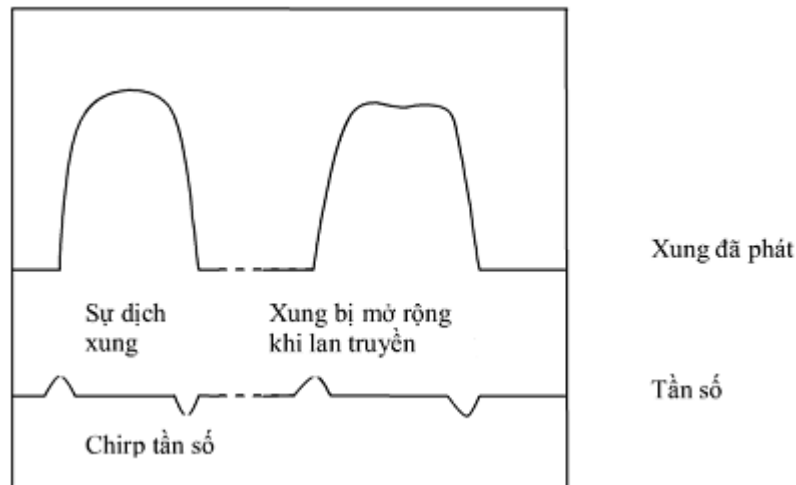
$$\bar{\gamma} \cdot P_{in} \cdot L_{eff} \ll 1 \Rightarrow P_{in} \ll \frac{1}{L_{eff} \cdot \bar{\gamma}} = \frac{\alpha}{\bar{\gamma}} \quad (2.24)$$

$$\text{Với } \alpha = 0.2 \text{ dB/Km} = 0.046 \text{ Km}^{-1}, \bar{\gamma} = 2 \text{ W}^{-1} \cdot \text{Km}^{-1}$$

ta có :

$$P_{in} \ll \frac{0.046}{2} = 0.023 \text{ W} = 23 \text{ mW} \quad (2.25)$$

Rõ ràng sự phụ thuộc chiết suất vào công suất quang là một yếu tố giới hạn với hệ thống truyền thông quang. Hiện tượng phi tuyến tương ứng với giới hạn này được gọi là tự điều chế pha SPM vì độ dịch pha  $\phi_{NL}$  được cảm ứng bởi chính trường quang. SPM tương tác với tán sắc sắc thể trong sợi quang để thay đổi tốc độ mở rộng xung khi nó lan truyền trong sợi quang. Khi tán sắc sắc thể trong sợi quang càng tăng ảnh hưởng của SPM càng lớn. Nó dẫn đến việc thay đổi các thành phần trong xung quang. Hiệu ứng này có thể xem như là cơ chế bị chirp không chỉ đơn giản do đặc tính nội tại của nguồn phát mà còn do tương tác phi tuyến với môi trường truyền dẫn của sợi. Điều này dẫn đến sự dịch các sườn xung, xung lên bị dịch về phía bước sóng dài hơn và xung xuống bị dịch về phía bước sóng ngắn hơn và dẫn tới một sự dịch tần trên mỗi sườn xung mà tương tác với tán sắc sợi để mở rộng xung.



Hình 2. 6. Hiện tượng mở rộng phổ của xung do SPM.

### **Điều chế chéo pha (XPM - Cross-Phase Modulation)**

Sự phụ thuộc của chỉ số chiết suất vào cường độ trường của sóng ánh sáng có thể cũng dẫn đến hiện tượng phi tuyến được biết là điều chế chéo pha. Nó chỉ xuất hiện trong hệ thống đa kênh và xảy ra khi hai hay nhiều kênh được truyền đồng thời trong



sợi quang sử dụng các tần số sóng mang khác nhau. Độ dịch pha phi tuyến cho một kênh riêng không phụ thuộc vào chỉ số chiết suất của kênh khác. Độ dịch pha cho kênh  $j$  là :

$$\phi_j^{NL} = \bar{\gamma} L_{eff} (P_j + 2 \sum_{m \neq j}^M P_m) \quad (2.26)$$

Trong đó :  $M$  là tổng số kênh

$P_j$  là công suất kênh  $j$  ( $j = \overline{1, M}$ ).

Hệ số 2 chỉ ra rằng XPM ảnh hưởng bằng 2 lần SPM với cùng công suất. Độ dịch pha tổng bây giờ phụ thuộc vào tất cả các kênh và có thể thay đổi từng bit phụ thuộc vào kiểu bit của kênh lân cận.

Nếu ta giả sử công suất các kênh truyền bằng nhau, độ dịch pha trong trường hợp xấu nhất khi tất cả các kênh truyền truyền đồng thời tất cả các bit 1 là :

$$\phi_j^{NL} = \frac{\bar{\gamma}}{\alpha} (2M - 1) P_j \quad (2.27)$$

Để  $\phi_j^{NL} \ll 1 \Rightarrow P_j < 1$  (mW) ngay cả với  $M = 10$  nếu chúng ta sử dụng giá trị  $\bar{\gamma}$  và  $\alpha$  ở vùng  $\lambda = 1,55 \mu m$ . Rõ ràng XPM có thể là nhân tố giới hạn công suất chính.

Tóm lại: Với những xung quang rộng tương đối ( $>100ps$ ), ảnh hưởng của tán sắc không đáng kể. Với những xung quang ngắn hơn, ảnh hưởng của tán sắc và ohi tuyến hoạt động cùng nhau trên xung dẫn đến nhiều đặc tính mới. Cụ thể sự mở rộng xung quang do tán sắc được giảm nhiều so với SPM. Thực tế một xung quang có thể lan truyền không méo nếu công suất đỉnh của chúng được lựa chọn tương ứng với Soliton cơ bản.

#### **Hiệu ứng trộn 4 sóng (FWM: Four-wave mixing)**

Sự phụ thuộc của chỉ số chiết suất vào cường độ có gốc của nó trong độ cảm phi tuyến bậc 3 được biểu diễn bởi  $\chi^{(3)}$ . Hiện tượng phi tuyến khác được biết đến từ sự trộn 4 sóng (FWM) cũng xuất phát từ giá trị hữu hạn của  $\chi^{(3)}$  trong sợi thủy tinh. Nếu 3 trường quang với tần số sóng mang  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  lan truyền đồng thời trong sợi,  $\chi^{(3)}$  tạo ra trường thứ tư mà tần số  $\omega_4$  của nó liên quan với các tần số qua công thức:  $\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ .

Về nguyên lý sẽ xuất hiện nhiều tần số tương ứng với các sự kết hợp khác nhau của các dấu +, -. Tuy nhiên trong thực tế hầu hết sự kết hợp của chúng không xây dựng được yêu cầu thích ứng pha. Sự kết hợp của dạng  $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$  là gây rắc

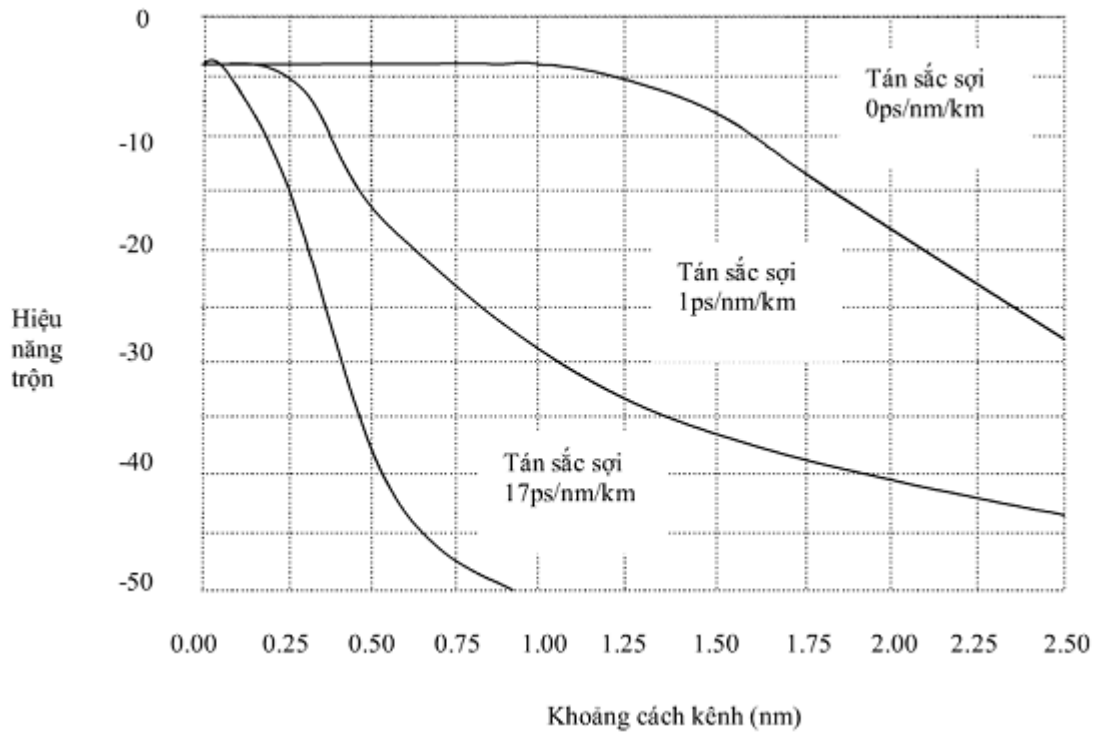
rối nhất cho hệ thống truyền thông quang đa kênh vì chúng có thể gần với pha được thích ứng khi bước sóng nằm ở vùng tán sắc bằng 0.

Hai yếu tố ảnh hưởng mạnh mẽ tới hiệu năng trộn là:

- Đầu tiên là khoảng cách kênh. Hiệu năng trộn sẽ tang mạnh mẽ khi khoảng cách kênh trở nên gần hơn.
- Thứ hai là tán sắc sợi. Hiệu năng trộn tỉ lệ nghịch với tán sắc sợi và lớn nhất ở vùng tán sắc sợi bằng 0 vì khi đó các sản phẩm trộn không mong muốn sẽ di chuyển cùng tốc độ. Do vậy trong thực tế, các sợi dịch tán sắc thường được thiết kế để có tán sắc dư ở bước sóng vận hành nhằm loại bỏ ảnh hưởng của FWM.

Ở mức cơ bản, một quá trình FWM có thể xem như một quá trình tán xạ mà hai photon năng lượng  $\hbar\omega_1$  và  $\hbar\omega_2$  tạo ra 2 photon năng lượng  $\hbar\omega_3$  và  $\hbar\omega_4$ . Điều kiện thích ứng pha bắt đầu từ yêu cầu duy trì động lượng. Quá trình FWM cũng có thể xảy ra khi hai phonon bắt đầu suy biến ( $\hbar\omega_1 = \hbar\omega_2$ ), vì vậy  $\omega_4 = 2\omega_1 - \omega_3$ .

FWM không ảnh hưởng đến hệ thống sóng ánh sáng đơn kênh nhưng lại trở nên quan trọng với các hệ thống đa kênh mà sử dụng ghép kênh phân chia theo bước sóng WDM. Một lượng công suất lớn của kênh có thể được truyền tới kênh lân cận qua FWM. Sự truyền năng lượng như vậy không chỉ làm suy hao công suất cho một kênh riêng mà còn dẫn đến xuyên âm giữa các kênh, làm giảm hiệu năng hệ thống quang. Tuy nhiên, hiệu ứng FWM cũng có ích với các hệ thống sóng ánh sáng. Nó sử dụng để giải ghép kênh khi ghép kênh phân chia theo thời gian được sử dụng trong miền quang. Từ những năm 1933, FWM đã được sử dụng để tạo tín hiệu ngược phổ qua quá trình phân chia pha quang (Optical Phase Conjugation) một trong các kỹ thuật sử dụng cho sự bù tán sắc và có thể cải thiện hiệu năng của hệ thống ánh sáng được hạn chế tán sắc.



Hình 2. 7. Hiệu ứng với các mức khoảng cách khác nhau theo khoảng cách kênh

### 2.5.3. Hiệu ứng liên quan tới tán xạ kích thích

#### Tán xạ kích thích Raman (SRS - Stimulated Raman-Scattering)

SRS là một loại của tán xạ không đàn hồi (tán xạ mà tần số ánh sáng phát ra bị dịch xuống). Ta có thể hiểu đây là một loại tán xạ của một photon tới photon năng lượng thấp hơn sao cho năng lượng khác xuất hiện dưới dạng một phonon. Quá trình tán xạ gây ra suy hao công suất ở tần số tới và thiết lập một cơ chế suy hao cho sợi quang. Ở mức công suất thấp, thiết diện tán xạ phải đủ nhỏ để suy hao là không đáng kể.

Ở mức công suất cao, hiện tượng phi tuyến SRS xảy ra cần xem xét đến suy hao sợi. Cường độ ánh sáng sẽ tăng theo hàm mũ mỗi khi công suất quang vượt qua giới hạn nhất định. Giá trị ngưỡng này được tính toán dựa trên việc cường độ ánh sáng tăng như thế nào so với tạp âm và được định nghĩa là công suất tới tại nơi nửa công suất bị mất bởi SRS ở cuối đầu ra sợi dài  $L$  và được tính như sau:

$$g_R \cdot P_{th} \cdot \frac{L_{eff}}{A_{eff}} \approx 16 \quad (2.28)$$

Trong đó:  $g_R$  là giá trị định của hệ số khuếch đại Raman.

$A_{eff}$  là diện tích hiệu dụng

$L_{eff}$  là chiều dài tương tác hiệu dụng

$$L_{eff} = \frac{1-e^{-\alpha L}}{\alpha} \text{ với } \alpha \text{ là suy hao sợi.}$$

Trong hệ thống truyền thông quang thực tế, sợi quang đủ dài để  $L_{eff} \approx 1/\alpha$ .  
Nếu thay  $A_{eff} = \pi\omega^2$ , với  $\omega$  là kích thước điểm

$$\Rightarrow P_{th} \approx \frac{16\pi\omega^2}{L_{eff} \cdot g_R} = \frac{16\alpha\pi\omega^2}{g_R} \quad (2.29)$$

Hệ số khuếch đại Raman  $g_R \approx 1 \cdot 10^{-13} m/W$  với sợi silic ở gần vùng bước sóng  $1 \mu m$  và tỉ lệ nghịch với bước sóng.

Nếu ta thay thế  $\pi\omega^2 = 50 \mu m$  và  $= 0,2 dB/Km$ ,  $P_{th} \approx 370 mW$  ở gần vùng  $1,55 \mu m$ . Vì công suất đặt trong sợi quang thường nhỏ (dưới  $10 mW$ ) nên tán xạ Raman kích thích (SRS) không gây hại nhiều tới suy hao sợi.

### ***Tán xạ kích thích Brillouin (SBS - Stimulated Brillouin - Scattering)***

Cũng giống với SRS, SBS là một loại của tán xạ không đàn hồi và cả hai rất giống nhau về nguồn gốc của chúng. Điểm khác nhau chính là các phonon quang tham gia trong tán xạ Raman còn tán xạ Brillouin có các phonon âm thanh tham gia. Mỗi quan hệ tán sắc khác nhau với các phonon quang và các phonon âm thanh dẫn đến vài điểm khác nhau cơ bản giữa chúng. Đó là hiệu ứng SBS trong sợi mode chỉ xảy ra theo hướng ngược còn SRS chiếm ưu thế trong hướng đi.

Mức công suất ngưỡng của SBS cũng được tính tương tự như sau:

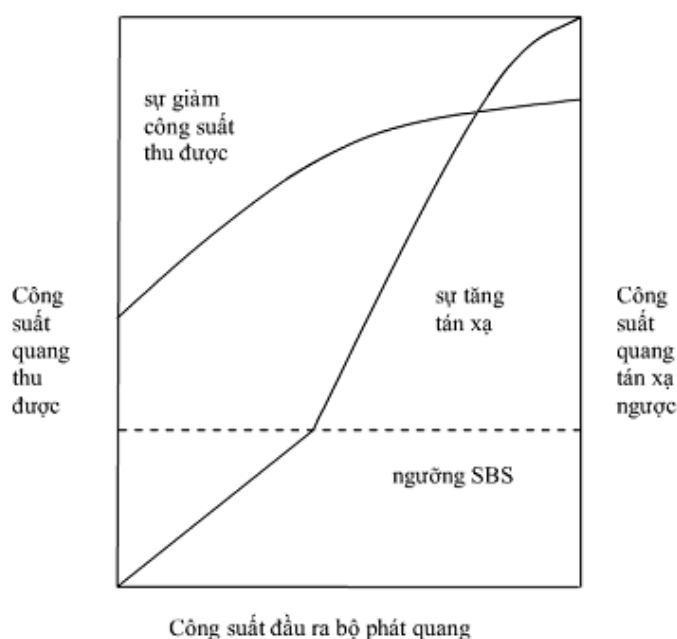
$$g_B \cdot P_{th} \cdot L_{eff} / A_{eff} \approx 21 \quad (2.30)$$

Trong đó:  $g_B$  là giá trị đỉnh của hệ số khuếch đại Brillouin

$$\text{Thay } L_{eff} \approx 1/\alpha, A_{eff} \approx \pi\omega^2 \Rightarrow P_{th} \approx 21\alpha(\pi\omega^2)/g_B \quad (2.31)$$

Hệ số khuếch đại Brillouin  $g_B \approx 5 \cdot 10^{-11} m/W$  với sợi silic lớp gấp hàng trăm lần hệ số khuếch đại Raman. Suy ra  $P_{th} \approx 1 mW$ , với cùng điều kiện ở gần bước sóng  $1,55 \mu m$ , nơi suy hao sợi nhỏ nhất.

Rõ ràng, SBS thiết lập một giới hạn trên đối với công suất quang vì giá trị ngưỡng của nó thấp. Khi công suất quang vượt quá ngưỡng, một phần lớn ánh sáng đã phát sẽ truyền lại bộ phát. Do đó, SBS gây ra sự bão hòa công suất quang trong máy thu, đồng thời cũng làm xuất hiện sự phản xạ ngược của tín hiệu quang và nhiều làm giảm tỉ lệ BER. Như vậy việc điều khiển SBS trong hệ thống truyền dẫn tốc độ cao là không thể thiếu.



Hình 2. 8. Sự tăng ánh sáng tán xạ ngược khi công suất quang tăng.

Việc tính toán  $P_{th}$  ở trên không tính đến ảnh hưởng của độ rộng phổ kết hợp với ánh sáng tới. Vì phổ khuếch đại cho sợi silic rất hẹp ( $<100\text{MHz}$ ), công suất ngưỡng có thể tăng đến  $10\text{mW}$  hoặc hơn bằng việc tăng trước băng tần khuếch đại tới  $200\text{--}400\text{MHz}$  qua sự điều chế pha. Bởi vậy, SBS giới hạn mức công suất đặt dưới  $100\text{mW}$  trong hầu hết các hệ thống truyền thông quang.

Tóm lại: cả SRS và SBS có thể được sử dụng để cải tiến trong thiết kế hệ thống truyền thông quang vì chúng có thể khuếch đại một trường quang bằng việc truyền năng lượng tới nó từ một trường bơm với bước sóng được chọn thích hợp. SRS đặc biệt có ích vì một băng tần cực lớn ( $\sim 10\text{THz}$ ) kết hợp với dạng phổ khuếch đại Raman của silic. Cả SRS và SBS đều có thể sử dụng để làm bộ khuếch đại Raman sợi và khuếch đại Brillouin sợi tương ứng.

#### 2.5.4. So sánh các hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang

Các hiệu ứng phi tuyến khác nhau dựa trên hiệu ứng Kerr được so sánh trong Bảng 2.1. Các tham số được so sánh là: tốc độ bit, nguồn, ảnh hưởng của độ nhạy thứ ba, dạng mở rộng, chuyển đổi năng lượng giữa phương tiện và xung quang; ảnh hưởng của khoảng cách kênh.

Bảng 2. 2. So sánh hiệu ứng khúc xạ phi tuyến.

Hiện tượng phi tuyến  Đặc trưng	SPM	CPM	FWM
Tốc độ bit	Phụ thuộc	Phụ thuộc	Độc lập
Nguồn	Nhạy cảm phi tuyến $X^{(3)}$	Nhạy cảm phi tuyến $X^{(3)}$	Nhạy cảm phi tuyến $X^{(3)}$
Hiệu ứng $X^{(3)}$	Dịch pha do xung	Dịch pha do tín hiệu cùng truyền lan	Tạo ra sóng mới
Dạng mở rộng	Đối xứng	Có thể đối xứng	---
Chuyển đổi năng lượng giữa phương tiện và xung quang	Không	Không	Không
Khoảng cách kênh	Không ảnh hưởng	Tăng khi giảm khoảng cách	Tăng khi giảm khoảng cách

## 2.6. Kết luận chương 2

Hệ thống MMW-RoF là một hệ thống truyền thông lai ghép giữa thông tin sợi quang và thông tin vô tuyến, do vậy nó chịu ảnh hưởng của cả hai môi trường này. Hiệu năng của hệ thống MMW-RoF bị suy giảm do ảnh hưởng của các nguồn nhiễu và phi tuyến do liên kết truyền dẫn quang gây ra. Ngoài ra, hiệu năng của hệ thống này còn chịu tác động của môi trường vô tuyến như suy hao và fading.

Tất cả các hiệu ứng này đều có những ưu khuyết điểm riêng, yêu cầu người thiết kế hệ thống phải ý thức được điều này để có thể đưa ra các phương pháp tối ưu để giảm thiểu ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến.

### CHƯƠNG 3: ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG PHI TUYẾN CỦA TRUYỀN DẪN SÓNG VÔ TUYẾN QUA SỢI QUANG TRONG HỆ THỐNG 5G

Bản chất hệ thống RoF dùng trong hệ thống 5G là truyền dẫn sóng vô tuyến milimet qua sợi quang. Ngoài các ưu điểm như hỗ trợ tốc độ truy cập cao, khả năng chuyển giao nhanh và đơn giản thì dải tần này còn có thể được sử dụng tự do mà không cần cấp phép.

Trong chương này, sẽ tiến hành phân tích nghiên cứu đường lên của các hệ thống Trạm gốc (BS), trong đó, mỗi Thiết bị đầu cuối di động (MT) sử dụng sơ đồ điều chế đơn sóng mang theo tần số miền (SC-FDE). Các tín hiệu kết hợp tại mỗi BS được phát hiện hoặc phân tách bằng Bộ xử lý trung tâm (CPU) với các bộ Cân bằng phản hồi quyết định lặp khối (IB-DFE, Iterative Block Decision Feedback Equalization). Trong nghiên cứu này, cho rằng liên kết giữa BS và CPU sử dụng truyền dẫn sóng vô tuyến qua sợi (Radio-over-Fiber, RoF), các chuyển đổi điện và quang được thực hiện bởi bộ điều chế ngoài Mach-Zehnder (MZ), MZ gây ra méo phi tuyến. Sau đó đưa ra đề xuất thiết kế các máy thu mạnh tận dụng các đặc điểm thống kê của méo phi tuyến.

#### 3.1. Giới thiệu

Các mạng di động thế hệ tiếp theo, thế hệ thứ năm (5G), sẽ củng cố nhu cầu phát triển các dịch vụ truy cập không dây băng rộng tốc độ cao. Cùng với nó, yêu cầu quản lý về hiệu quả quang phổ và xuyên nhiễu là bắt buộc. Vì thế, 5G dự định cung cấp một mạng lưới các thiết bị đầu cuối di động dày đặc băng thông rộng, cũng như số lượng lớn tế bào pico và femto trong một môi trường cụm tế bào nhỏ. Phù hợp với các kịch bản phân cụm và cung cấp các cải tiến đáng kể về hiệu quả phổ tần, sơ đồ cộng tác của trạm gốc (BS) là một thiết kế hợp lý cho các hệ thống không dây trong tương lai.

Trái với các sơ đồ thông thường, trong đó thiết bị đầu cuối di động (MT) sử dụng các tần số khác nhau cho các ô liên kề để tránh nhiễu liên tế bào, trong các BS cộng tác, MT có thể truyền dẫn bằng cách sử dụng cùng một kênh vật lý, cho phép tái sử dụng tần số chung. Sau đó, các tín hiệu kết hợp nhận được tại một BS nhất định được gửi đến bộ xử lý trung tâm (CPU) thực hiện việc tách các tín hiệu liên quan đến các MT khác.

Các kỹ thuật truyền khối, kết hợp với xử lý miền tần số được chứng minh là rất mạnh mẽ đối với các hệ thống di động băng rộng như BS cộng tác. Các phương pháp này bao gồm ghép kênh phân chia tần số trực giao (OFDM) và sóng mang đơn với cân bằng miền tần số (SC-FDE). Điều chế SC-FDE và OFDM yêu cầu hiệu suất và xử lý tín hiệu giống hệt nhau, tuy nhiên, dao động đường biên của tín hiệu OFDM cao hơn nhiều so với SC-FDE, điều đó chỉ ra rằng OFDM thích hợp cho đường xuống và SC-FDE thích hợp cho đường lên.

Một cách tiếp cận mới đối với việc cung cấp dịch vụ không dây băng thông rộng là hệ thống truyền dẫn qua sợi quang (RoF), bản chất là truyền tín hiệu tần số vô tuyến thông qua sợi quang. Trong các hệ thống RoF, có thể sử dụng các dải sóng milimet trong các liên kết không dây ngắn ở đầu cáp quang cục bộ, truyền dẫn tín hiệu vô tuyến qua sợi quang giữa các BS và các thiết bị trung tâm (CU). Hơn nữa, các tín hiệu kết hợp nhận được từ các MT khác nhau được phát hiện và phân tách bằng cách thực hiện thu lặp dựa trên nguyên lý IB-DFE <sup>[4]</sup>.

Ở đây, chúng ta cho rằng đường lên của các hệ thống BS cộng tác có bên trong đó các MT sử dụng sơ đồ điều chế SC-FDE. Các tín hiệu kết hợp nhận được tại một BS nhất định được gửi đến CPU thông qua công nghệ RoF, trong đó các chuyển đổi quang điện và điện quang được thực hiện thông qua bộ điều chế Mach-Zehnder (MZ). Hơn nữa, liên kết RoF giữa BS và CPU có thể được điều chế dưới dạng băng thông phi tuyến không nhớ. Ở đây, người nghiên cứu sẽ đưa ra một thiết kế các máy thu mạnh hiệu quả có thể đáp ứng cho đặc tính phổ của biến dạng phi tuyến tạo ra bởi quá trình chuyển đổi điện và quang.

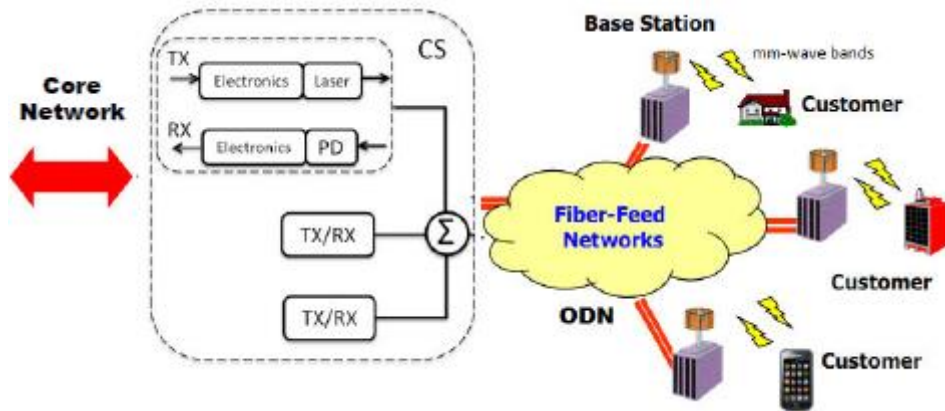
Trong chương này sẽ quy ước sử dụng các ký hiệu trong các công thức toán học như sau: chữ hoa in đậm biểu thị ma trận hoặc vectơ;  $I_N$  biểu diễn ma trận  $N \times N$ ;  $X^*$ : biểu diễn ma trận liên hợp phức,  $X^T$ : ma trận chuyển vị,  $X^H$ : biểu diễn ma trận hermit. Nói chung, chữ thường biểu thị các biến miền thời gian và chữ hoa biểu thị các biến miền tần số;  $\tilde{x}$ ,  $\hat{x}$  và  $\bar{x}$  biểu diễn mẫu. Kỳ vọng của  $x$  được ký hiệu là  $\mathbb{E}[x]$ . <sup>[3]</sup>

### 3.2. Đặc điểm hệ thống

Về cơ bản, hệ thống vô tuyến sóng milimet qua sợi quang (MMW-RoF) bao gồm ba phân hệ chính: site trung tâm (CS), mạng phân phối quang (ODN) và trạm gốc (BS). Hệ thống này được trình bày trong hình 3.1. CS thực hiện nhiều chức năng phức



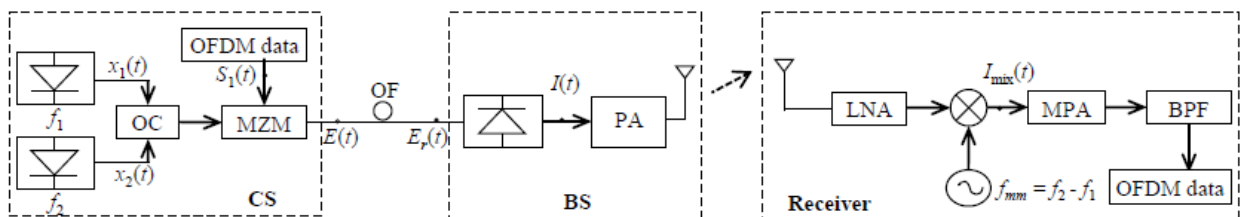
tập như điều chế, giải điều chế và tạo sóng mang milimet. Ngược lại, BS phải đơn giản vì cần số lượng lớn BS. CS liên lạc với các BS thông qua ODN.



Hình 3. 1. Sơ đồ hệ thống RoF sóng milimet điển hình

Trong hệ thống như vậy, việc tạo và truyền sóng milimet qua sợi quang là vấn đề quan trọng đang thu hút nhiều nghiên cứu. Có nhiều cách tiếp cận trong việc tạo ra sóng mm quang, đó là điều chế trực tiếp, điều chế ngoài, điều chế tần số dị hóa và chuyển đổi độ dài sóng. Trong số các phương pháp này, các sơ đồ điều chế ngoài đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống RoF do khả năng khắc phục các khiếm khuyết của điều chế trực tiếp. Tuy nhiên, trong sơ đồ điều chế ngoài cổ điển, hai MZM được sử dụng để tạo tín hiệu sóng milimet. MZM đầu tiên tạo ra sóng milimet và MZM thứ hai hoạt động như một bộ điều biến cường độ để điều biến dữ liệu OFDM thành tín hiệu sóng milimet. Tín hiệu MMW được truyền qua cáp quang từ CS đến BS.

Hình 3.2 cho thấy kiến trúc về hệ thống OFDM MMW-RoF.



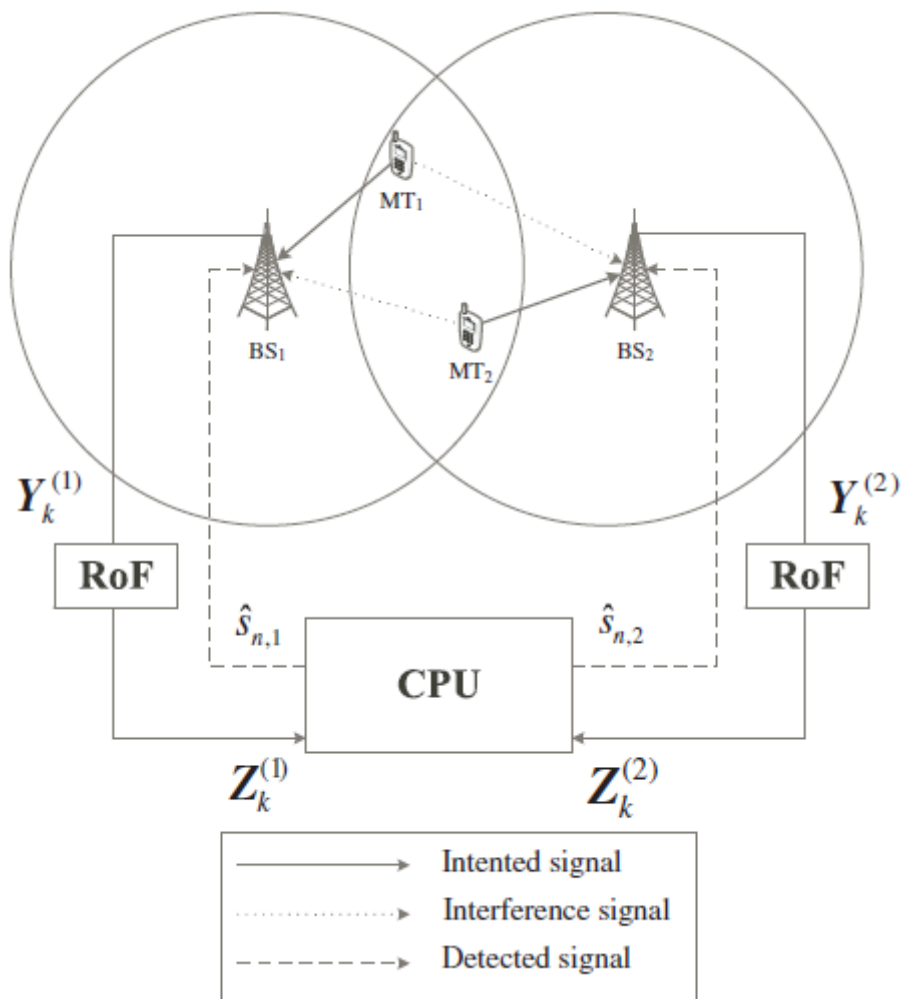
Hình 3. 2. Biểu diễn kiến trúc của hệ thống OFDM MMW-RoF. CS, BS, OF, OC, MZM, PA, LNA, MPA và BPF bao gồm site trung tâm, trạm gốc, cáp quang, bộ ghép quang, bộ điều chế Mach-Zehnder, bộ khuếch đại công suất, bộ khuếch đại nhiễu thấp, bộ khuếch đại công suất trung bình và bộ lọc thông dải.

Như có thể thấy trong hình, hai sóng mang quang ( $f_1$  và  $f_2$ ) được kết hợp tại một bộ ghép quang (OC), và sau đó được điều chế bằng tín hiệu OFDM tại bộ điều chế Mach-Zehnder (MZM), dựa trên điều chế quang carrier-suppressed double-sideband

(OCS-DSB). Tín hiệu quang được điều chế được truyền qua sợi quang đến trạm gốc, trong đó một điốt quang (PD) được sử dụng để chuyển đổi nó thành tín hiệu điện. Ở đầu ra của PD, sóng milimet được tạo ra do sự pha trộn của hai sóng mang quang, trong đó  $f_{mm} = f_2 - f_1$ . Về mặt lý thuyết, tín hiệu sóng milimet sẽ được lọc, khuếch đại và đưa vào ăng-ten để phát trong không gian. Tuy nhiên, để đơn giản hóa hình vẽ, bộ lọc và bộ khuếch đại không được hiển thị trong hình. Tại máy thu, tín hiệu thu được sẽ được khuếch đại bởi bộ khuếch đại nhiễu thấp (LNA) trước khi “nhân” với tín hiệu từ bộ dao động, có tần số là  $f_{mm}$ . Cuối cùng, tín hiệu OFDM thu được sau khi chuyển đến bộ khuếch đại công suất trung bình (MPA) và bộ lọc thông dải (BPF).

### 3.3. Mô hình khảo sát RoF ứng dụng trong mạng 5G

#### 3.2.1. Liên kết vô tuyến



Hình 3. 3. Minh họa mô hình hệ thống vô tuyến BS cộng tác

Mô hình hệ thống vô tuyến BS cộng tác được nghiên cứu trong chương này được đặc trưng bởi  $P$  các MT truyền luồng dữ liệu độc lập lên đến  $R$  các BS và chia sẻ cùng một kênh vật lý, thể hiện tính chọn lọc tần số mạnh. [6]

Theo sơ đồ BS cộng tác, tại mỗi BS, các tín hiệu kết hợp được coi là hữu ích hơn thay vì có mỗi một MT được gán riêng cho một BS nhất định và các tín hiệu từ các MT khác bị coi là nhiễu.

Việc phân tách các tín hiệu khác nhau được thực hiện trong một đơn vị trung tâm sau khi nhận được từ mỗi BS qua liên kết RoF.

Mỗi MT sử dụng điều chế SC-FDE với kích thước khối  $N$  và điều chế khóa dịch pha cầu phương (QPSK) với ánh xạ Gray.

Dữ liệu được truyền bởi người dùng thứ  $p$  được biểu diễn:

$$S^{(p)} = [s_0^{(p)} s_1^{(p)} \dots s_{N-1}^{(p)}]^T$$

với cyclic prefix (CP) có độ dài phù hợp được gán vào mỗi khối. Thông qua một biến đổi Fourier rời rạc (DFT), khối dữ liệu cũng có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$S^{(p)} = DFT(s^{(p)}) = [s_0^{(p)} s_1^{(p)} \dots s_{N-1}^{(p)}]^T$$

Tại BS thứ  $r$  và sau khi loại bỏ các mẫu CP, luồng dữ liệu nhận được theo miền thời gian được cho bởi:  $y^{(r)} = [y_0^{(r)} y_1^{(r)} \dots y_{N-1}^{(r)}]^T$ ,

$$\text{với } y_n^{(r)} = \sum_{p=1}^P \xi_{p,r} s_n^{(p)} \otimes h_{n,p}^{(r)} + v_n^{(r)} \quad (3.1)$$

trong đó,  $\otimes$  biểu thị tích chập tuần hoàn.  $s_n^{(p)}$  tương ứng với biểu tượng dữ liệu  $n$  được truyền đi từ người dùng thứ  $p$ .

Đáp ứng kênh được biểu diễn bởi  $h_{n,p}^{(r)}$  và  $v_n^{(r)}$  biểu thị mẫu thứ  $n$  liên quan đến nhiễu trắng Gaussian (AWGN)

$$v^{(r)} = [v_0^{(r)} v_1^{(r)} \dots v_{N-1}^{(r)}]^T,$$

trong miền tần số là:

$$N^{(r)} = DFT(v^{(r)}) = [N_0^{(r)} N_1^{(r)} \dots N_{N-1}^{(r)}]^T$$

Hơn nữa,  $\xi_{p,r}$  là một tham số trọng số tính các tác động kết hợp của điều khiển công suất và tổn thất lan truyền, với công suất nhận được trung bình liên quan đến MT thứ  $p$  tại BS thứ  $r$  tương ứng với  $|\xi_{p,r}|^2$ . Trong miền tần số, công thức (3.1) có thể được viết là:

$$Y_k^{(r)} = \sum_{p=1}^P S_{k,p} H_{k,p}^{eq(r)} + N_k^{(r)} \quad (3.2)$$

với  $(r)$  biểu thị thành phần thứ  $k$  DFT của khối

$$y^{(r)} = [y_0^{(r)} y_1^{(r)} \dots y_{N-1}^{(r)}]^T$$

Trong đó:

$$Y^{(r)} = DFT(y^{(r)}) = [Y_0^{(r)} Y_1^{(r)} \dots Y_{N-1}^{(r)}]^T$$

$S_{k,p}$  là dữ liệu được truyền bởi MT thứ  $p$  trên sóng mang con thứ  $k$ .  $N_k^{(r)}$  cho biết thành phần nhiễu miền tần số liên quan đến ăng ten thứ  $r$  và tần số thứ  $k$ .

Tuy nhiên:

$$H_{k,p}^{eq(r)} = \xi_{p,r} H_{k,p}^{(r)} \quad (3.3)$$

trong đó  $H_{k,p}^{(r)}$  biểu diễn đáp ứng tần số kênh giữa MT thứ  $p$  và BS thứ  $r$  cho tần số thứ  $k$  (xem xét đáp ứng tần số kênh được chuẩn hóa với  $E[|H_{k,p}^{(r)}|^2] = 1$ ).

Thông thường, các điều kiện kênh liên quan đến các sơ đồ truyền SC-FDE phân tán thời gian với đặc tính lan truyền đa đường. Do đó, các mẫu miền thời gian  $y_n^{(r)}$  có thể được xem là quá trình Gaussian phức có trung bình bằng 0 được thể hiện bởi:

$$\begin{aligned} 2\sigma_y^{(r)^2} &= E[|y_n^{(r)}|^2] = \sum_{p=1}^P |\xi_{p,r}|^2 E[|s_n^{(p)}|^2] + E[|v_n^{(r)}|^2] \\ &= \sum_{p=1}^P |\xi_{p,r}|^2 2\sigma_s^2 + 2\sigma_v^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Trong đó:

$$\sigma_s^2 = [|\text{Re}\{s_n^{(p)}\}|^2] = E[|\text{Im}\{s_n^{(p)}\}|^2] \quad (3.5)$$

Và

$$\sigma_v^2 = [|\text{Re}\{v_n^{(p)}\}|^2] = E[|\text{Im}\{v_n^{(p)}\}|^2] \quad (3.6)$$

tương ứng với các biểu tượng và các phương sai nhiễu. Cần lưu ý rằng hai phương sai này là bằng nhau cho tất cả các MT và BS.

### 3.2.2. Liên kết ROF

Tín hiệu nhận được tại BS thứ  $r$  sau đó được chuyển đổi sang miền tương tự (thể hiện các tín hiệu bị méo phi tuyến ở đầu ra MZ mà không có răng cưa trong hình) tạo ra tín hiệu  $y(t)^{(r)}$ . Chúng ta sẽ bỏ qua sự phụ thuộc vào  $t$  vì mục đích đơn giản hóa các ký hiệu và được gửi đến liên kết RoF như có thể thấy trong Hình 3.3.

Liên kết này được mô hình hóa bởi băng thông phi tuyến không nhớ cho bộ điều chế MZ và bởi nhiễu bất nguồn từ liên kết RoF. Băng thông phi tuyến được đặc trưng bởi các hàm được gọi là điều chế biên độ - điều chế biên độ (AM-AM) và các hàm điều chế biên độ - điều chế pha (AM-PM). Do gặp phải giá trị nhiễu cao trong chuyển đổi quang điện nó cần phải hoạt động trong các vùng phi tuyến. Do đó, khi đầu vào của chúng là  $y^{(r)}$ , thì đầu ra của chúng có thể cho bởi:

$$\begin{aligned} z^{(r)} &= f(y^{(r)}) \\ &= A(|y^{(r)}|) \exp(j(\theta(|y^{(r)}|) + \arg(y^{(r)}))) \end{aligned} \quad (3.7)$$

trong đó các hàm phi tuyến  $A(\cdot)$  và  $\Theta(\cdot)$  tương ứng là các hàm chuyển đổi AM-AM và AM-PM. Trong trường hợp này, bộ điều chế MZ chỉ có chức năng chuyển đổi AM-AM, thì có:

$$A(|y^{(r)}|) = \begin{cases} A_M \sin\left(\frac{\pi}{2A_M}|y^{(r)}|\right), & |y^{(r)}| < A_M \\ A_M, & |y^{(r)}| \geq A_M \end{cases} \quad (3.8)$$

Trong đó,  $A_M$  đại diện cho biên độ bão hòa.

Sau đây, chúng ta sẽ đề cập đến biên độ bão hòa chuẩn hóa  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  vì cường độ của các hiệu ứng méo phi tuyến được chi phối bởi tỷ lệ này.

**Lưu ý:** vì  $\sigma_y^{(r)^2}$  xấp xỉ bằng nhau với tất cả các BS, nên ở đây chúng ta bỏ sự phụ thuộc vào  $r$  và cho phương sai của phần thực và phần ảo của tín hiệu nhận được tại một BS đã cho là  $2\sigma_y^2$ .

Phương sai của phần thực và phần ảo của liên kết RoF phụ thuộc vào công suất đầu ra khi bão hòa, tức là:

$$\sigma_{RoF}^2 = \frac{A_M^2}{K_{RoF}} \quad (3.9)$$

Do đó,  $K_{RoF}$  là biến điều khiển cường độ của nhiễu này.

### 3.4. Kết quả thực hiện đánh giá khảo sát

#### 3.4.1. Phân tích đánh giá hiệu ứng nhiễu phi tuyến

Trong phần này sẽ mô tả các tín hiệu bị méo phi tuyến liên quan đến bộ điều chế MZ. Tận dụng ưu điểm của phép tính gần đúng Gaussian cho các tín hiệu ở đầu ra bộ điều chế MZ chúng ta có thể vận dụng lý thuyết Bussgang. Trong các điều kiện

này, tín hiệu bị biến dạng phi tuyến trong miền thời gian liên quan đến BS thứ  $r$  có thể bị phân tách thành tổng của hai thành phần không tương quan:

$$z^{(r)} = \alpha y^{(r)} + d^{(r)} \quad (3.10)$$

Trong đó  $d^{(r)}$  biểu diễn biến dạng phi tuyến và  $\alpha$  biểu diễn một yếu tố tỷ lệ có thể đạt được là:

$$\alpha = \frac{E[z^{(r)}y^{*(r)}]}{E[|y^{(r)}|^2]} = \frac{E[z^{(r)}y^{*(r)}]}{2\sigma_y^2} \quad (3.11)$$

Bằng cách xác định tự tương quan tín hiệu ở đầu vào của bộ điều chế MZ là  $R_y(\tau)$ , nó có thể chỉ ra tự tương quan tín hiệu đầu ra  $R_z(\tau)$  được tính toán như công thức sau:

$$R_z(\tau) = \sum_{\gamma=0}^{+\infty} 2P_{2\gamma+1} \frac{(Re(R_y(\tau)))^{2\gamma+1} + j(Im(R_y(\tau)))^{2\gamma+1}}{R_y(0)^{2\gamma+1}} \quad (3.12)$$

Trong đó  $2\gamma + 1$  là công suất liên quan đến IMP bậc  $2\gamma + 1$ , được định nghĩa là

$$P_{2\gamma+1} = \frac{\left( \int_{-\infty}^{+\infty} f(y)p(y)H_{2\gamma+1}\left(\frac{y}{\sqrt{2\sigma_y}}\right)dy \right)^2}{2^{2\gamma+1}(2\gamma+1)!} \quad (3.13)$$

Trong đó  $2\gamma + 1 (\cdot)$  là đa thức Hermite của bậc  $2\gamma + 1$ .

Mật độ phổ công suất trung bình (PSD) của tín hiệu bị méo phi tuyến thu được bằng cách lấy biến đổi Fourier của tự tương quan đầu ra, tức là  $G_z(f) = DFT(R_z(\tau))$ . Hình 3.4 cho thấy mối liên quan PSD giữa mô phỏng và lý thuyết cho một BS và kênh cụ thể khi xem xét bộ điều chế MZ có  $\frac{A_M}{\sigma_y} = 3.0$ .

Cần lưu ý rằng ở đầu ra MZM, ta cũng có thể tận dụng lý thuyết Bussgang để phân chia tín hiệu PSD bị méo phi tuyến thành tổng của hai PSD: một tỷ lệ thuận với tín hiệu đầu vào PSD và một có liên quan đến méo phi tuyến. Vì thế chúng ta có:

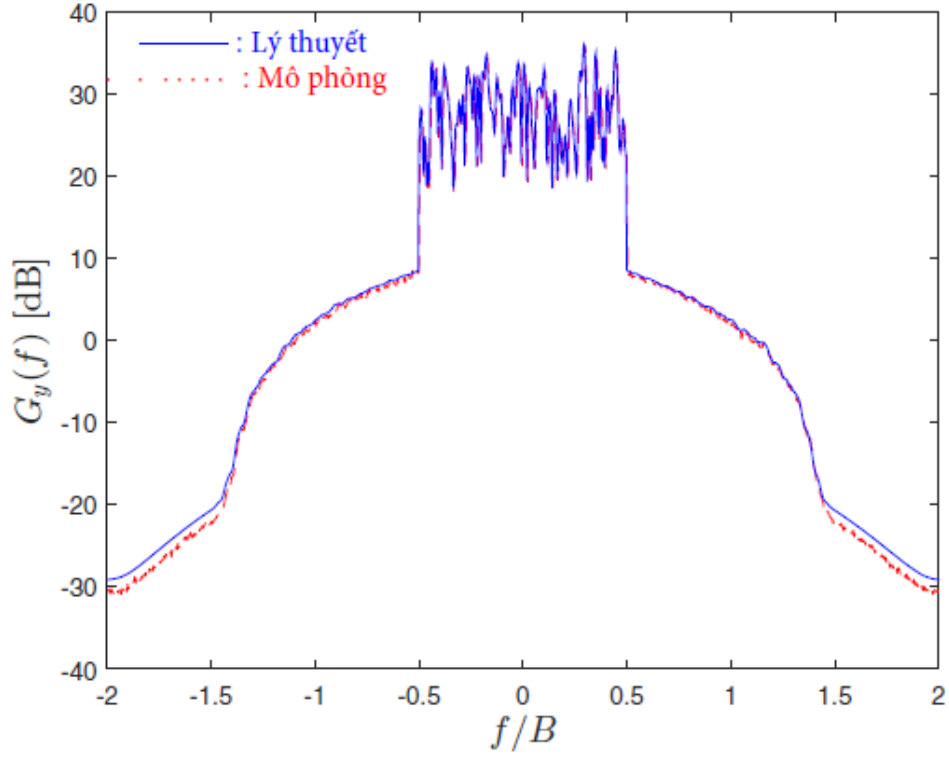
$$G_z(f) = |\alpha|^2 G_y(f) + G_d(f) \quad (3.14)$$

Như có thể thấy trong hình 3.4 và 3.5, phương pháp phân tích trên cho phép thu được các ước tính rất chính xác về PSD liên quan đến các tín hiệu đầu ra cũng như PSD của méo phi tuyến. Tại CPU, tín hiệu thu được được lọc và lấy mẫu. Do đó, trong miền tần số, nó có thể được biểu diễn bằng:

$$Z^{(r)} = [Z_0^{(r)} Z_1^{(r)} \dots Z_{N-1}^{(r)}]^T$$

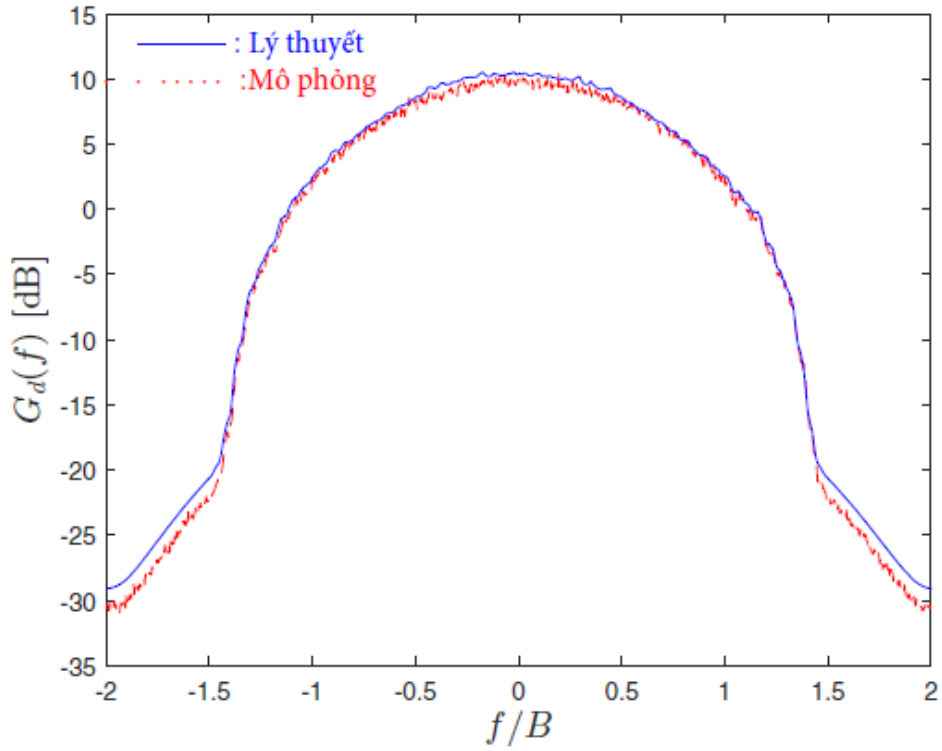
$$Z_k^{(r)} = \alpha Y_k^{(r)} + D_k^{(r)} + W_k^{(r)} \quad (3.15)$$

trong đó  $D_k^{(r)}$  và  $W_k^{(r)}$  đại diện cho các mẫu miền tần số liên quan đến biến dạng phi tuyến và nhiễu từ liên kết RoF, được đại diện bởi các khối tương ứng  $D^{(r)} = [D_0^{(r)} D_1^{(r)} \dots D_{N-1}^{(r)}]^T$  và  $W^{(r)} = [W_0^{(r)} W_1^{(r)} \dots W_{N-1}^{(r)}]^T$ .



Hình 3. 4. PSD của tín hiệu bị méo phi tuyến  $z^{(r)}$  có  $\frac{A_M}{\sigma_y} = 3.0$  với một kênh.<sup>[6]</sup>

Hình 3.5 cho thấy PSD mô phỏng và lý thuyết của méo phi tuyến  $d^{(r)}$  liên quan đến một BS và kênh nhất định sử dụng bộ điều chế MZ với  $\frac{A_M}{\sigma_y} = 3.0$ .



Hình 3. 5. PSD của tín hiệu bị méo phi tuyến  $d^{(r)}$  có  $\frac{A_M}{\sigma_y} = 3.0$  với một kênh.<sup>[6]</sup>

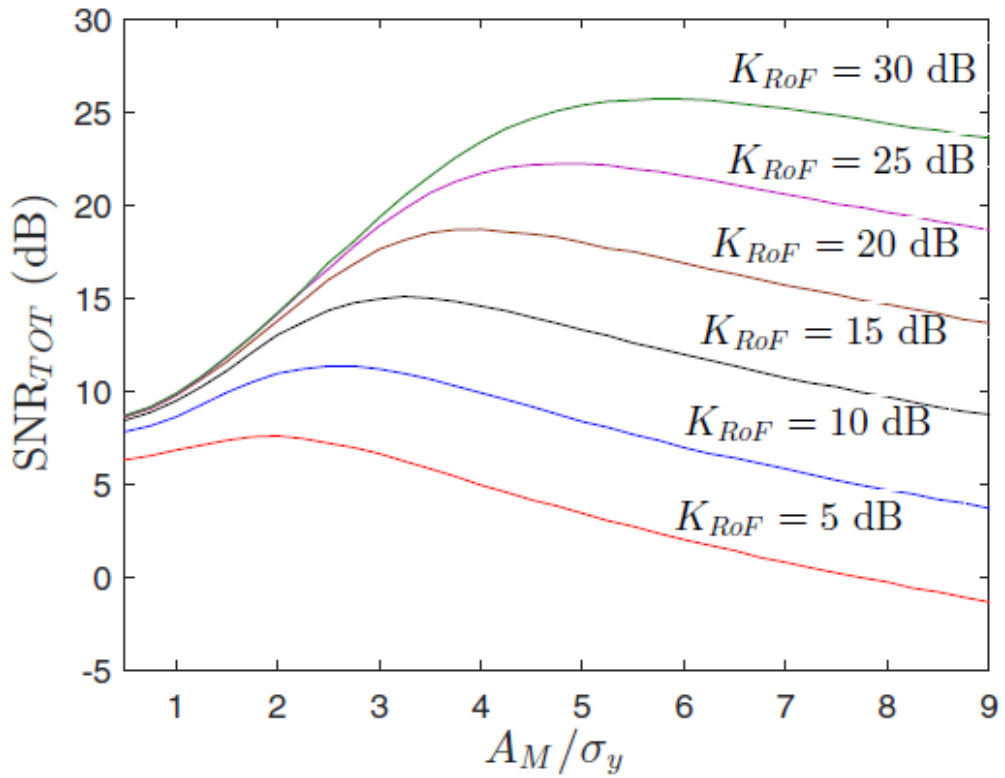
Lưu ý rằng hiệu suất sẽ bị ảnh hưởng bởi hai yếu tố này. Do đó, bằng cách xem xét sự hiện diện của cả biến dạng phi tuyến cũng như nhiễu từ liên kết RoF, người ta có thể định nghĩa  $SNR_{TOT}$  cho sóng mang con thứ  $k$  và kênh đã cho là:

$$SNR_{TOTk} = \frac{|\alpha|^2 E[|Y_k|^2]}{E[|D_k|^2] + E[|W_k|^2]} \quad (3.16)$$

trong đó, cần lưu ý rằng  $E[|D_k|^2] = G_d\left(\frac{k}{T}\right) = 2\sigma_D^2(k)$

Hình 3.6 cho thấy sự thay đổi của  $SNR_{TOT}$  trung bình, trung bình dọc theo tất cả các khối sóng mang con cho các giá trị khác nhau của  $K_{RoF}$  và các mức bão hòa khác nhau.





Hình 3. 6. Sự thay đổi của  $SNR_{TOT}$  trung bình xem xét với các giá trị khác nhau của  $K_{RoF}$ .<sup>[6]</sup>

Từ hình biểu diễn trên, có thể thấy rằng, với giá trị  $K_{RoF}$  đã cho, có một giá trị tối ưu  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  cho  $SNR_{TOT}$  thấp nhất.

Điều này có thể được giải thích bởi thực tế là các giá trị  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  thấp dẫn đến các giá trị nhiễu thấp từ liên kết RoF (xem công thức 3.9).

Tuy nhiên, giá trị  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  thấp cũng có nghĩa là cường độ của biến dạng phi tuyến cao vì rất có khả năng bộ điều chế MZ đang hoạt động ở khu vực phi tuyến.

Khi  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  tăng, hoạt động của bộ điều chế MZ sẽ tuyến tính hơn và độ méo phi tuyến giảm. Tuy nhiên, trong các điều kiện này, cường độ của nhiễu từ liên kết RoF tăng lên có nghĩa là  $SNR_{TOT}$  giảm. Vì lý do này, có một mức tối ưu của  $\frac{A_M}{\sigma_y}$  sẽ cho ra hiệu suất tốt nhất.

#### 4.4.2. Thiết kế Bộ thu

Trong các kiến trúc tế thông tin di động thông thường, các ô khác nhau được coi là các thực thể riêng biệt và mỗi thiết bị đầu cuối di động (MT) được gán cho một ô đã cho hay một trạm gốc nhất định (BS). MT truyền tín hiệu của nó đến BS tương

ứng và khi tín hiệu này được nhận bởi một BS khác thì nó bị coi là nhiễu. Trong các kiến trúc BS cộng tác, các tín hiệu giữa các MT và BS khác nhau được thu thập và xử lý bởi một đơn vị xử lý trung tâm (CPU) để thực hiện phân tách người dùng hoặc giảm thiểu nhiễu. Các sơ đồ của BS cộng tác này liên quan đến giảm thiểu nhiễu, cho phép sử dụng cùng một kênh vật lý bởi các MT trong các ô liền kề, điều này có nghĩa là công suất hệ thống tổng thể có thể được cải thiện đáng kể. Hiện nay các kỹ thuật truyền khối kết hợp với xử lý miền tần số là lựa chọn cho các hệ thống không dây băng thông rộng. Những kỹ thuật này bao gồm ghép kênh phân chia tần số trực giao (OFDM) và sóng mang đơn với cân bằng miền tần số (SC-FDE).

Tuy nhiên, độ phức tạp của máy thu cao hơn đối với SC-FDE và độ phức tạp của máy phát cao hơn đối với OFDM. Nếu tính đến dao động đường bao của tín hiệu sóng mang đơn thấp hơn nhiều so với dao động đường bao của tín hiệu OFDM với cùng chòm sao, SC-FDE rõ ràng thích hợp hơn cho việc truyền tải đường lên trong khi OFDM phù hợp cho việc truyền dẫn đường xuống. Ở đây cho rằng đường lên của hệ thống không dây băng thông rộng với kiến trúc BS cộng tác sử dụng các sơ đồ điều chế SC-FDE. Các MT trong các ô liền kề có thể chia sẻ cùng một kênh vật lý và các tín hiệu mà một BS thu được được số hóa, thông qua các quy trình lấy mẫu và lượng tử hóa thích hợp. Việc tách các tín hiệu liên quan đến các MT khác nhau được thực hiện bằng cách sử dụng các máy thu miền tần số lặp dựa trên khái niệm IB-DFE. Do tính chất xử lý tự nhiên của nó, IB-DFE có thể được coi là bộ cân bằng turbo phức tạp thấp trong miền tần số. Do đó, IB-DFE không cần bộ giải mã kênh đầu ra tại vòng phản hồi.

Các tín hiệu kết hợp nhận được tại một BS nhất định được gửi đến CPU thông qua công nghệ RoF, trong đó các chuyển đổi quang điện và điện quang được thực hiện thông qua bộ điều chế Mach-Zehnder (MZ). Hơn nữa, liên kết RoF giữa BS và CPU có thể được điều chế dưới dạng băng thông phi tuyến không nhớ. Ở đây sẽ đưa ra một thiết kế các máy thu mạnh hiệu quả có thể đáp ứng cho đặc tính phổ của biến dạng phi tuyến tạo ra bởi quá trình chuyển đổi điện và quang.

### **Lặp khối DFE (IB-DFE):**

Trong IB-DFE, cả bộ lọc tiếp liệu và bộ lọc phản hồi đều được triển khai trong miền tần số. Bộ cân bằng bao gồm hai phần: 1) bộ lọc tiếp liệu, cân bằng một phần cho xuyên nhiễu và 2) tín hiệu phản hồi, loại bỏ một phần nhiễu còn lại. Trong IB-DFE,

thiết kế của bộ lọc tín hiệu và giám sát dữ liệu khác nhau được lặp lại  $N_I$  lần. Trong trường hợp này, việc lan truyền lỗi do phản hồi bị giới hạn trong một khối. Hơn nữa, các hoạt động tiếp liệu và phản hồi đều được hiện thực hóa trong miền tần số. Mặt khác, do việc phát hiện được thực hiện trên cơ sở từng khối, nên hiệu quả của phản hồi để loại bỏ xuyên nhiễu bị giới hạn bởi độ tin cậy của dữ liệu được phát hiện ở lần lặp trước. Trên thực tế, quá trình lặp lại tăng dần độ tin cậy của dữ liệu được phát hiện. Tuy nhiên, nếu dữ liệu được phát hiện ban đầu quá kém, quá trình lặp có thể không thể hủy bỏ nhiễu một cách hiệu quả.<sup>[4]</sup>

Trên thực tế, đối với các máy thu MIMO, chúng ta có thể xem xét hai sơ đồ giám sát:

- MIMO-DFE hoặc phát hiện với loại bỏ xuyên nhiễu song song (PIC - parallel interference cancellation). Trong trường hợp này, phát hiện bao gồm  $N_T$  các giai đoạn phát hiện song song, trong đó các biểu tượng của tất cả các luồng tại một thời điểm nhất định được phát hiện đồng thời bằng cách xử lý tuyến tính tín hiệu thu được và loại bỏ một phần xuyên nhiễu từ các luồng khác và nhiễu xen kẽ dư sử dụng dữ liệu được phát hiện trước đó.
- DFE phân lớp thời gian - không gian (LST-DFE: Layered space-time DFE) hoặc phát hiện với loại bỏ xuyên nhiễu liên tiếp (SIC - successive interference cancellation), trong đó chúng phát hiện một luồng tại một thời điểm và hủy xuyên nhiễu từ các luồng đã được phát hiện, cũng như xuyên nhiễu xen kẽ còn lại cho luồng đang được phát hiện.
- Mặc dù cấu trúc PIC nói chung phức tạp hơn, nhưng nó cho phép thiết kế song song, có thể thuận lợi từ quan điểm thực hiện. Hơn nữa, độ trễ phát hiện của các cấu trúc PIC thấp hơn nhiều so với cấu trúc SIC và không cần thiết phải xếp hạng các luồng. Tuy nhiên, hiệu suất của PIC kém hơn vì việc phát hiện các luồng kém hơn do bị ảnh hưởng bởi sự xuyên nhiễu cao từ các luồng mạnh hơn.

Theo cách tiếp cận PIC, ở mỗi lần lặp  $q$  chúng ta có thành phần DFT (biến đổi Fourier rời rạc) của các biểu tượng mềm được lấy lại từ bộ phát hiện cho mỗi luồng  $i$  trong miền tần số, được kí hiệu là  $m_{s_p}(i, q-1), i = 1, 2, \dots, N_T$ . Để phát hiện luồng  $i$ , trước tiên, xóa ước tính xuyên nhiễu mạnh nhất đối với  $\mathbf{R}_p$  khỏi các luồng khác và sau

đó thực hiện cân bằng. Trong quá trình cân bằng IB-DFE được thực hiện bằng cả bộ lọc vector  $1 \times N_R$  hàng cho cho đường tiếp liệu miền tần số  $C_p^{(i,q)}$  và bằng cách loại bỏ nhiễu giao thoa còn lại thông qua tín hiệu phản hồi  $Y_p^{(i,q)}$  có biểu thức được xác định như sau. Do đó, đầu ra bộ cân bằng tần số không gian ở tần số  $p$  cho luồng  $i$  ở lần lặp thứ  $q$  là:

$$\tilde{S}_p^{(i,q)} = C_p^{(i,q)} \left[ R_p - \sum_{m=1, m \neq i}^{N_T} H_p^{(m)} m_{\hat{S}_p^{(m,q-1)}} \right] + Y_p^{(i,q)} \quad (3.17)$$

Ở lần lặp đầu tiên ( $q=1$ ), các điều khoản phản hồi bằng 0 và bộ cân bằng là bộ cân bằng MSE tối thiểu tuyến tính. Trong trường hợp  $N_T = 1$  và  $N_R > 1$  tương ứng với một kích bản nhận được. Trong trường hợp này, thiết kế máy thu vẫn có hiệu lực một cách tự nhiên, chúng ta không cần phải loại bỏ nhiễu giữa các anten trong công thức (3.17) và hệ số máy thu vẫn được đưa ra bởi công thức (3.22). Lưu ý rằng đối với SIC, chúng ta giám sát các luồng liên tiếp cho mỗi lần lặp và sử dụng  $m_{\hat{S}_p^{(m,q)}}$  bất cứ khi nào, tức là đối với các luồng đã được phát hiện ở mỗi lần lặp.

Sau khi cân bằng công thức (3.17), IDFT của  $\{\tilde{S}_p^{(i,q)}\}, p=0,1,...,P-1$ , với  $\{\tilde{d}_n^{(i,q)}\}, n=0,1,...,M-1$  mà ở đó phát hiện mềm được thực hiện.

Cụ thể,  $\tilde{d}_n^{(i,q)}$  được mô tả là tổng của tín hiệu dữ liệu mong muốn và thành phần nhiễu từ xuyên nhiễu và giao thoa dư, nó được mô hình hóa như một biến ngẫu nhiên Gaussian phức tạp với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai  $\sigma_{SD}^{(i,q)2}$ . Do đó xác suất phát hiện sau của giám sát  $\hat{d}_n^{(i,q)} = \alpha$ , trong đó  $\alpha$  thuộc về chòm sao A, là

$$f_{\hat{d}_n^{(i,q)}(\alpha)} = K_0 e^{-|\tilde{d}_n^{(i,q)} - \beta^{(i,q)} \alpha|^2 / \sigma_{SD}^{(i,q)2}}, \quad (3.18)$$

$$\alpha \in A, n=0,1,...,M-1$$

với  $\beta^{(i,q)}$  là mức tăng của tín hiệu mong muốn và  $K_0$  là hệ số chuẩn hóa.

Biểu tượng được phát hiện mềm trong miền thời gian là giá trị trung bình của  $\hat{d}_n^{(i,q)}$ , cho  $n=0,1, \dots, M-1$ ,

$$m_{\hat{d}_n^{(i,q)}} = E \left[ \hat{d}_n^{(i,q)} \right] = \sum_{\alpha \in A} \alpha f_{\hat{d}_n^{(i,q)}}(\alpha) \quad (3.19)$$

Trong (3.17) tín hiệu được phát hiện mềm trong miền tần số,  $\left\{ m_{\hat{s}_p^{(m,q)}} \right\}$ , được sử dụng để hủy các luồng khác là DFT cỡ P của  $\left\{ m_{\hat{d}_n^{(i,q)}} \right\}$ , được mở rộng bằng chuỗi nhiễu giả (PN).

Sai số toàn phương trung bình (MSE) cho luồng thứ i ở lần lặp thứ q là:

$$\begin{aligned} J_{SD}^{(i,q)} &= \frac{1}{P^2} \sum_{p=0}^{P-1} \left\{ \sigma_w^2 C_p^{(i,q)} C_p^{(i,q)H} + C_p^{(i,q)} \right. \\ &\times \sum_{m=1}^{N_T} \zeta_p^{(m,q-1)} H_p^{(m)} H_p^{(m)H} H_p^{(i,q)H} \\ &+ \left( m_{\hat{s}_p^{(i,q-1)}} + \psi_{\hat{s}_p^{(i,q)}} \right) \\ &\times \left( C_p^{(i,q)} H_p^{(i)} H_p^{(i)H} C_p^{(i,q)H} - 1 \right) \\ &+ \left| Y_p^{(i,q)} \right|^2 \\ &\left. + 2 \operatorname{Re} \left[ Y_p^{(i,q)*} m_{\hat{s}_p^{(i,q-1)}} \left( C_p^{(i,q)} H_p^{(i)} - 1 \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Tối giản công thức (3.20) với  $Y_p^{(i,q)}$  và  $C_p^{(i,q)}$ , ta có:

$$Y_p^{(i,q)} = m_{\hat{s}_p^{(i,q-1)}} \left[ 1 - C_p^{(i,q)} H_p^{(i)} \right] \quad (3.21)$$

và

$$C_p^{(i,q)} = H_p^{(i)H} \left[ \sum_{m=1}^{N_T} H_p^{(m)} H_p^{(m)H} + \frac{\sigma_w^2}{\psi_{\hat{s}_p^{(m,q-1)}}} I_{N_R} \right]^{-1} \quad (3.22)$$

Tăng nhẹ hiệu suất một chút bằng cách thêm các ràng buộc mức tăng đơn nhất của tín hiệu hữu ích, đó là  $\beta^{(i,q)} = C_p^{(i,q)} H_p^{(i)} = 1$ . Trong trường hợp này,  $C_p^{(i,q)}$  trở thành một phiên bản thu nhỏ của (3.22).

Về độ phức tạp, ở mỗi lần lặp, một IDFT và phép nhân sóng mang phụ được thực hiện, do đó, đối với một hệ thống có duy nhất đầu ra và đầu vào, độ phức tạp của

cấu trúc là phép nhân phức tạp  $(N_l P \log_2(P)/M) - (P/M) + (P/M)$ , trong đó đã tính đến các (I)DFT và thêm  $P = M$  để tính toán các phép nhân thực tế khác nhau cần thiết cho việc tính toán các tín hiệu mềm. Đối với thiết kế, chỉ tính các phép nhân phức 3P trong việc tính toán các thành phần phụ thuộc kênh trong (3.21) và (3.22).

### Sơ đồ khối

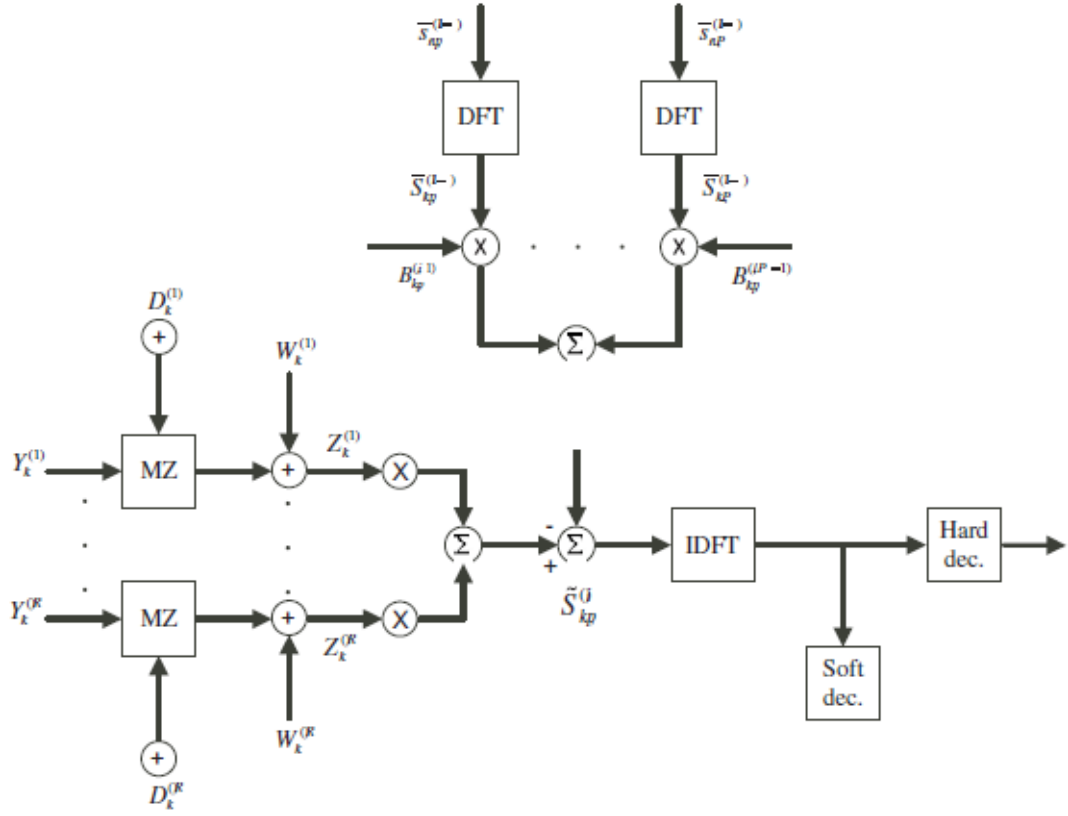
Hình 3.7 minh họa sơ đồ khối liên quan đến quá trình giám sát, sơ đồ này thiết kế dựa trên khái niệm IB-DFE. Phương pháp này cho phép phát hiện và tách tín hiệu hiệu quả liên quan đến các MT khác nhau, tận dụng tối đa các hiệu ứng đa dạng vĩ mô vốn có trong khi sử dụng sơ đồ tần số đơn. Trong mỗi lần lặp, các MT được tách ra theo phương pháp khử xuyên nhiễu liên tiếp (SIC), trong đó, cập nhật ước tính mới nhất về dữ liệu được truyền liên quan đến mỗi người dùng được sử dụng để hủy xuyên nhiễu còn lại.<sup>[6]</sup>

Ở lần lặp thứ  $i$ , các ký hiệu dữ liệu ước tính liên quan đến người dùng  $\{\hat{s}_n^{(p)}\}$  thứ  $p$  tương ứng với các quyết định của đầu ra máy dò miền thời gian  $\{\tilde{s}_n^{(p)}\} = IDFT\{\tilde{S}_k^{(p)}\}$ , trong đó IDFT là Biến đổi Fourier rời rạc ngược và  $\tilde{s}_n^{(p)}$  được biểu diễn bằng

$$\tilde{S}_{k,p} = F_{k,p}^T Z_k - B_{k,p}^T \bar{S}_{k,p} \quad (3.23)$$

$F_{k,p}^T = [F_{k,p}^{(1)}, \dots, F_{k,p}^{(R)}]$  và  $B_{k,p}^T = [B_{k,p}^{(1)}, \dots, B_{k,p}^{(P)}]$  lần lượt biểu thị các hệ số phản hồi và phản hồi liên quan, xác định trạng thái bộ dò tìm tại một lần lặp cho trước. hơn nữa,  $\bar{S}_{k,p}$  được tính bởi  $\bar{S}_{k,p} = [\bar{S}_{k,1}, \dots, \bar{S}_{k,p-1}, \bar{S}_{k,p}, \dots, \bar{S}_{k,P}]^T$ , trong đó,  $\bar{S}_{k,p}$  tương ứng với DFT của khối các giá trị trung bình miền thời gian được quyết định bởi đầu ra của bộ dò,  $\bar{S}_{n,p}$ .

Quá trình phát hiện cải thiện được cung cấp bởi tính toán của các hệ số tối ưu  $F_{k,p}$  và  $B_{k,p}$ .



Hình 3. 7. Sơ đồ khối máy thu đa người dùng IB-DFE.

Để làm như vậy, tiêu chí lỗi bình phương trung bình tối thiểu (MMSE) được sử dụng. Đối với MT thứ  $p$  và sóng mang con  $k$ , MSE cho các mẫu miền tần số  $\tilde{S}_{k,p}$  được cho bởi:

$$\theta_{k,p} = E \left[ \left| \tilde{S}_k^{(p)} - S_k^{(p)} \right|^2 \right] = E \left[ \left| F_{k,p}^T Z_k - B_{k,p}^T \bar{S}_k^{(p)} - S_k^{(p)} \right|^2 \right] \quad (3.24)$$

trong đó, tối thiểu hóa của nó là để:

$$\gamma_p = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{r=1}^R F_{k,p}^{(r)} H_{k,p}^{eq(r)} = 1 \quad (3.25)$$

với  $\gamma_p$  chỉ ra đáp ứng tần số kênh trung bình tổng thể. Áp dụng gradient (độ dốc) cho hàm Lagrange như sau:

$$J = \theta_{k,p} + \lambda(\gamma_p - 1) \quad (3.26)$$

các hệ số tối ưu  $F_k$  và  $B_k$  được cho bởi:

$$F_k = k(H_k^H(I_P - P^2)H_k + D_k)^{-1}H_k^H \quad (3.27)$$

Và

$$B_k = \alpha H_k F_k - I_P \quad (3.28)$$

với  $D_k$  tương ứng với:

$$D_k = \text{diag} \left( \left\{ \frac{|\alpha|^2 \sigma_N^{(r)^2} + \sigma_D^{(r)^2}(k) + \sigma_{RoF}^{(r)^2}}{|\alpha|^2 \sigma_S^2}; r = 1, \dots, R \right\} \right) \quad (3.29)$$

$K$  được chọn sao cho  $\gamma_p = 1$ , để có một FDE được chuẩn hóa với  $E[\tilde{s}_n^{(p)}] = s_n^{(p)}$ . Ngoài ra,  $\sigma_N^{(r)^2}$  và  $\sigma_S^2$  tương ứng là phương sai của các phần thực và phần ảo của nhiễu kênh và các thành phần mẫu dữ liệu.

### 3.4.3. Kết quả thực hiện

Trong phần này sẽ trình bày về kết quả hiệu suất tỷ lệ lỗi bit (BER) khi xem xét hệ thống được mô tả trong các phần trước của chương. Như đã đề cập, các kênh biểu diễn đặc tính lan truyền đa luồng và chọn lọc tần số với 64 vòi đa luồng. Hơn nữa, ở đây xem xét fading Rayleigh không tương quan trên các thành phần đa đường khác nhau. Trong nghiên cứu giả định ước tính và đồng bộ hóa kênh là hoàn hảo.<sup>[6]</sup>

Đối với tất cả P tín hiệu được truyền đi liên quan tới mỗi  $r$  ăng ten, cho  $\xi_{p,r} = 0 \text{ dB}$ ,  $N=256$  và một CP (cyclic prefix) thích hợp. Mỗi kết quả hiệu suất BER so sánh với biên bộ lọc phù hợp (MFB) được cung cấp.

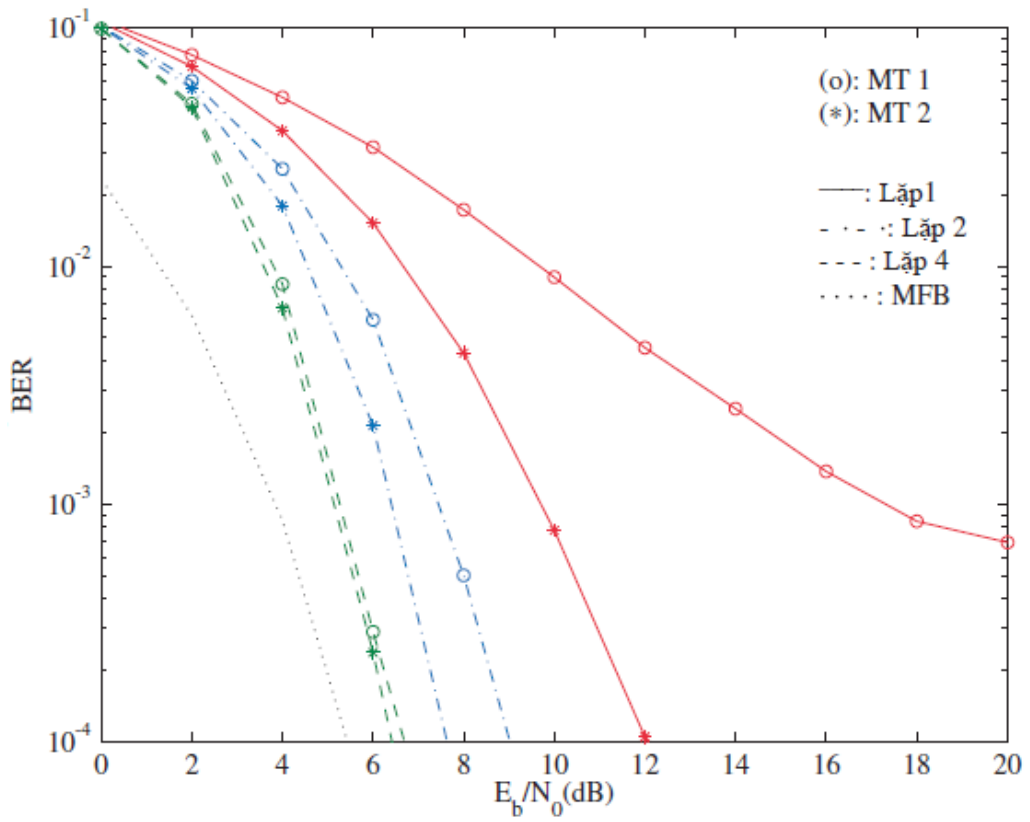
Đầu tiên, chúng ta hãy xem xét sơ đồ truyền dẫn của BS cộng tác với  $P = 2$  MT và  $R = 2$  BS trong Hình 3.8. Biến kiểm soát cường độ của nhiễu từ liên kết RoF tương ứng với  $K_{RoF} = 20 \text{ dB}$ , với mức bão hòa  $A_M = 4$ , đó là giá trị tối ưu trong trường hợp  $K_{RoF}$  cụ thể này, như trong biểu diễn trong Hình 3.6. Trong hình này, có thể hiểu cơ chế lặp và cách nó cải thiện việc đánh giá BER. Để đơn giản, chỉ hiển thị các lần lặp 1, 2 và 4, vì lần lặp thứ 3 không có thêm thông tin liên quan.

Từ kết quả, ta có thể nhận thấy rằng quá trình lặp cải thiện BER, với một sự thay đổi đáng kể từ lần lặp đầu tiên (tức là, FDE tuyến tính) sang các lần lặp tiếp theo. Hơn nữa, có thể thấy rằng máy thu có thể phát hiện và tách tín hiệu hiệu quả khỏi các MT khác nhau, tận dụng tín hiệu liên quan đến một MT nhất định tại mỗi BS. Do đó, hiệu suất BER rất gần với MFB chỉ sau 4 lần lặp.

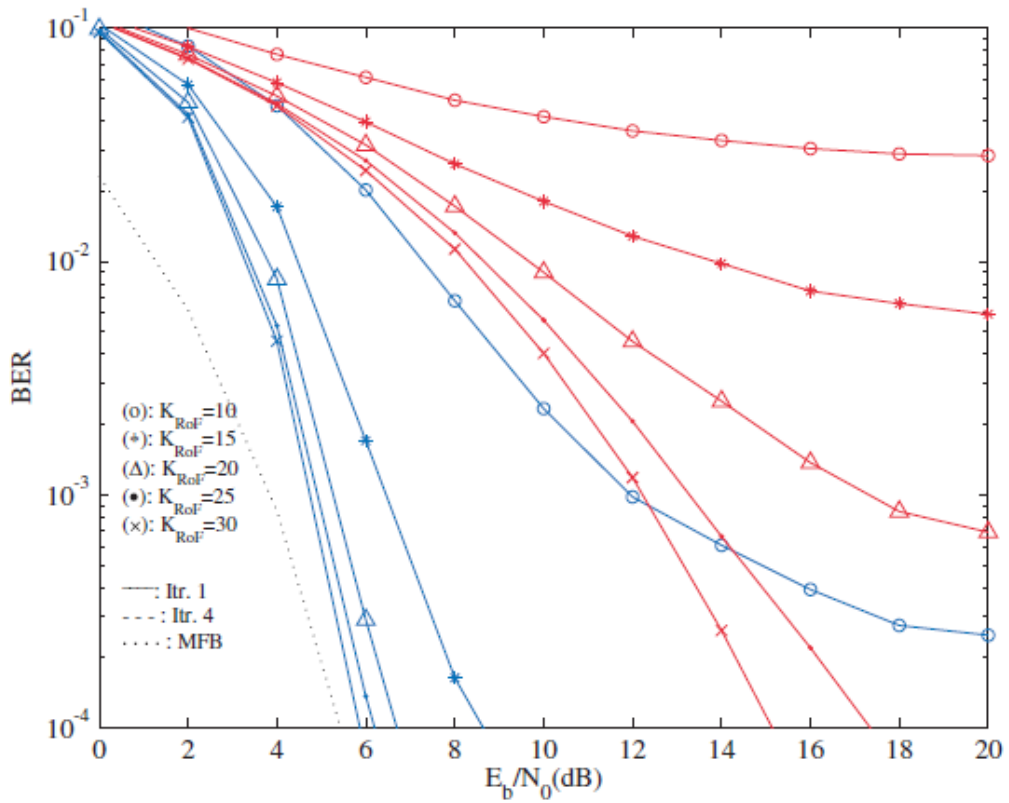
Để đánh giá tác động của nhiễu từ thành phần liên kết RoF, chúng ta hãy phân tích hình 3.9 và 3.10, tương ứng với sự giám sát MT thứ 1 và 2. Trong các hình này chỉ trình bày các lần lặp 1 và 4 và nhiễu từ liên kết RoF được kiểm tra với các giá trị khác nhau của  $K_{RoF}$ , với mỗi giá trị tối ưu cho  $A_M$ .

Đúng như mong đợi, với sự gia tăng của  $K_{RoF}$  cường độ nhiễu từ liên kết RoF giảm và hiệu suất BER được cải thiện, ổn định với  $K_{RoF} = 20 \text{ dB}$ .

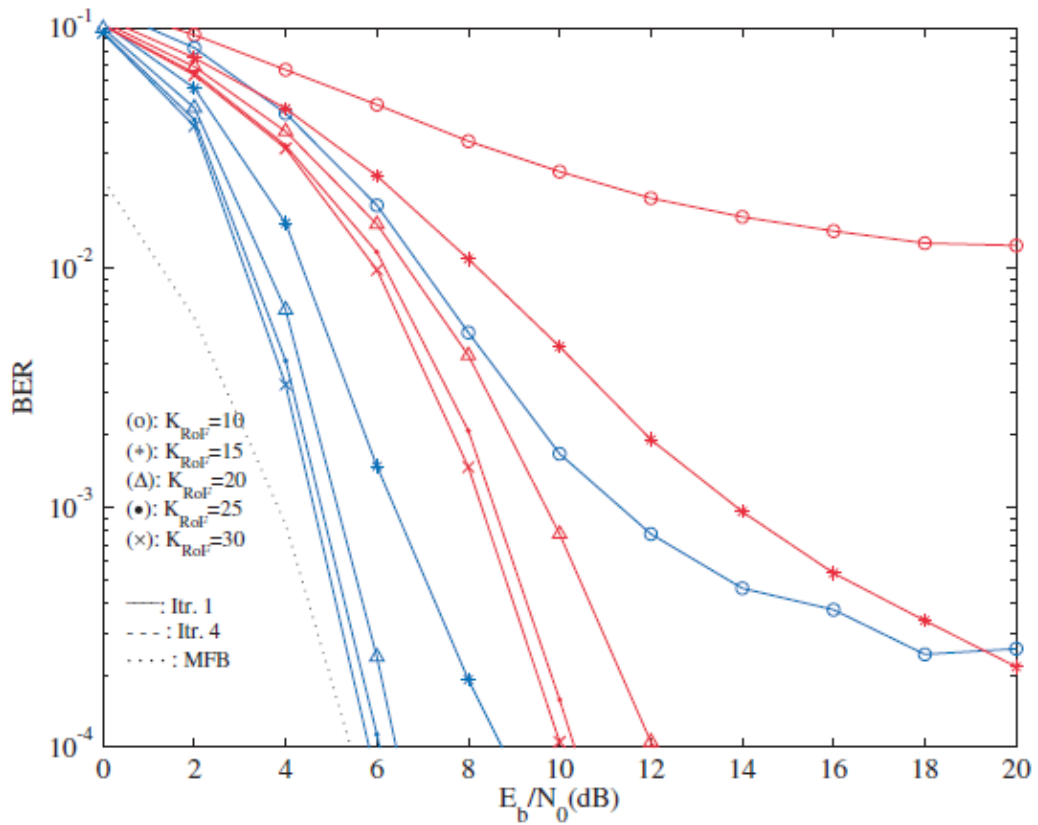




Hình 3. 8. Hiệu suất BER đối với BS cộng tác với  $P=2\text{MT}$ ,  $R=2\text{BS}$ ,  $K_{RoF}=20$  và  $A_M=4^{[6]}$



Hình 3. 9. Hiệu suất BER của BS cộng tác với  $P=2\text{ MT}$ ,  $R=2\text{ BS}$  và các giá trị khác nhau của  $K_{RoF}(p=1)^{[6]}$



Hình 3. 10. Hiệu suất BER của BS cộng tác với  $P = 2$  MT,  $R = 2$  BS và các giá trị khác nhau của  $K_{RoF}$  ( $p = 2$ ).<sup>[6]</sup>

### 3.5. Kết luận chương 3

Trong chương này đã phân tích và tính toán đường lên của các hệ thống BS cộng tác, trong đó liên kết giữa mỗi BS và CPU được thực hiện thông qua kết nối RoF. Chuyển đổi quang và điện được thực hiện bởi một bộ điều chế MZ vốn có méo phi tuyến được trình bày. Ngoài ra, trong chương này còn đưa ra một sơ đồ tối ưu hóa giám sát để tối đa hóa SNR tương ứng. Sơ đồ thiết kế máy thu được đề xuất có tính đến cả hiệu ứng không dây và quang học đã được chứng minh là có thể đạt hiệu quả cao.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Hệ thống MMW-RoF đã được xem là giải pháp đầy tiềm năng để tăng dung lượng, vùng phủ, băng tần, cũng như giảm chi phí cho các mạng truy nhập vô tuyến băng rộng trong tương lai (mạng di động 5G).

Nội dung luận văn đã đạt được mục tiêu đề ra là: tìm hiểu về công nghệ và ứng dụng của truyền dẫn thông tin vô tuyến qua sợi quang (RoF); phân tích các tham số ảnh hưởng đến hiệu suất hệ thống RoF; phân tích, đưa ra đề xuất thiết kế các máy thu mạnh tận dụng các đặc điểm thống kê của méo phi tuyến.

Dự kiến kết quả đóng góp của luận văn là phân tích và tính toán đường lên của các hệ thống BS cộng tác, trong đó liên kết giữa mỗi BS và CPU được thực hiện thông qua kết nối RoF. Đưa ra đề xuất thiết kế các máy thu mạnh tận dụng các đặc điểm thống kê của méo phi tuyến.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận văn sẽ tập trung vào nghiên cứu ứng dụng công nghệ MMW-RoF cho các kịch bản cụ thể có tính cấp thiết cao như mạng truy nhập vô tuyến băng rộng cho đường sắt cao tốc, tàu điện ngầm hay cho các tầng hầm trong tòa nhà.

## DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Trần Hoàng Giang (2013), Nghiên cứu tính năng hệ thống RoF sử dụng kỹ thuật OFDM, Học viện công nghệ bưu chính viễn thông, Hà Nội.
- [2]. TS. Đặng Thế Ngọc, Ths. Phạm Thị Thúy Hiền (2012), “Công nghệ truyền sóng qua sợi quang -RoF”. Tạp chí công nghệ thông tin và truyền thông.
- [3]. Nguyễn Khắc Tuấn Nam(2013), Nghiên cứu kỹ thuật truyền sóng vô tuyến 60GHz qua sợi quang, Học viện công nghệ bưu chính viễn thông, Hà Nội.
- [4]. N. Benvenuto, R. Dinis, D. Falconer, and S. Tomasin, “Single Carrier Modulation With Nonlinear Frequency Domain Equalization: An Idea Whose Time Has Come Again,” Proceedings of the IEEE, vol. 98, no. 1, pp. 69 –96, Jan. 2010.
- [5]. "Performance Analysis of Radio-over-Fiber Based on Phase-Modulation and Direct-Detection for the Future 5G Network" - ICTON 2018.
- [6]. F. Casal Ribeiro ; J. Guerreiro ; R. Dinis ; F. Cercas ; A. Silva ; Armando N. Pinto, Nonlinear Effects of Radio over Fiber Transmission in Base Station Cooperation Systems, 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)