

TÍNH TOÁN ĐỘ NHẠY THU CỦA TUYẾN THÔNG TIN QUANG M-QAM CÓ SỬ DỤNG KHUẾCH ĐẠI QUANG

INVESTIGATION OF RECEIVER SENSITIVITY OF M-QAM OPTICAL COMMUNICATION LINKS WITH OPTICAL AMPLIFIER

Lê Trung Thành
Trường Đại học GTVT Hà Nội

Trần Đức Hân, Đỗ Đình Hưng, Nguyễn Duy Huyền
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp phân tích, tính toán, thiết kế hệ thống truyền dẫn quang M-QAM, một công nghệ mới đang được quan tâm hiện nay. Các tham số quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn như các nguồn tạp âm của bộ khuếch đại và bộ tách sóng quang đã được phân tích, đánh giá. Đã xây dựng phương pháp tính toán độ nhạy thu quang cho hệ thống M-QAM có sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA như bộ tiền khuếch đại PA. Đã khảo sát định lượng sự phụ thuộc của công suất thu sau bộ tách sóng quang vào các tham số của hệ thống như hệ số khuếch đại G , mức điều chế M , hệ số tạp âm NF , băng tần bộ lọc quang B_o , hệ số bức xạ tự phát N_{sp} , tỉ số lỗi bit BER và tốc độ bit R_b ...v.v. Kết quả phân tích thu được sẽ là cơ sở cho bài toán thiết kế hệ thống M-QAM. Với cự ly truyền dẫn L km cùng tốc độ bit R_b (Gbps) và tỉ số lỗi bit BER.... cho trước người thiết kế dễ dàng tính toán xác định được một bộ thông số tối ưu cho hệ thống.

ABSTRACT

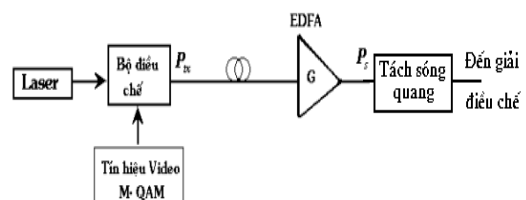
The purpose of this paper is to propose a method for analysis and calculation of M-QAM optical transmission system, a technology that has been attracting much attention recently. A numbers of noise sources such as noise from optical amplifier and from optical detector, which all have an influence on the sensitivity and consequently an accurate estimation of the receiver sensitivity of the system is analyzed... A calculation method of the receive sensitivity of M-QAM transmission system using the optical fibre amplifier EDFA as PA is studied. The theory results are simulated on computer using different parameters of the system such as: the gain G of EDFA, the NF of amplifier, the BER, M -modulation level, band of optical filter B_o , bit rate R_b and spontaneous emission coefficient N_{sp} ... The results of the analysis has applied to design the M-QAM transmission systems. With given transmission distance L km, bit rate R_b and BER, a designer can calculate different parameters of the system, to determine the optimal saturable gain of the amplifier.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Độ nhạy thu quang là một tham số rất quan trọng và cần phải được tính toán trong quá trình thiết kế một tuyến thông tin quang. Trong các tuyến thông tin quang truyền tín hiệu khoá đóng-mở (OOK:On-Off Keying), độ nhạy thu đã được nghiên cứu khá chi tiết trong một số công trình [1.6.7]. Tuy nhiên, trong hệ thống thông tin quang truyền tín hiệu M-QAM thì chưa có một kết quả nghiên cứu chi tiết nào. Bài báo đề xuất phương pháp tính toán độ nhạy thu quang và cự ly truyền dẫn của tuyến thông tin quang M-QAM. Các kết quả này sẽ được mô phỏng, đánh giá và so sánh với các tham số khác nhau của hệ thống có sử dụng và không sử dụng EDFA.

II. PHƯƠNG PHÁP TÍNH ĐỘ NHẠY THU QUANG CỦA TUYẾN THÔNG TIN QUANG M-QAM

Giả sử bộ khuếch đại quang EDFA được sử dụng làm tiền khuếch đại (PA) trong hệ thống (hình 1).



Hình 1. Hệ thống thông tin quang M-QAM

Tỷ số công suất sóng mang trên tạp âm CNR sau tách sóng quang của hệ thống này sẽ được tính theo [2,3,4]:

$$CNR = \frac{0,5m^2 I_s^2}{\sigma_{total}^2}, \quad (1)$$

trong đó, m là chỉ số điều quang, I_s là dòng photon sau tách sóng quang và σ_{total}^2 là tổng công suất tạp âm sau tách sóng.

Đồng thời, mối quan hệ giữa CNR và xác suất lỗi bit BER của tín hiệu M-QAM được tính theo [3]:

$$BER = \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q \left[\sqrt{\frac{3 \log_2 L}{L^2 - 1} \frac{2E_b}{N_0}} \right] = \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q \left[\sqrt{\frac{3}{L^2 - 1} CNR_{avr}} \right] \quad (2)$$

trong đó $M=L^2$ là số mức điều chế; E_b, N_0 tương ứng là năng lượng bit và mật độ tạp âm; $Q(x)$ được xác định qua hàm bù sai lỗi:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right);$$

CNR_{avr} là tỷ số công suất sóng mang trên tạp âm trung bình sau tách sóng quang [7]:

$$CNR_{avr} = \frac{1}{M} CNR \left(\sum_{i=1}^M A_i^2 \right) = CNR \frac{M-1}{3(\sqrt{M}-1)^2} A_{\max}^2 \quad (3)$$

trong đó A_i là biên độ của điểm tín hiệu thứ i , $A_{\max}$ là biên độ cực đại.

Theo định nghĩa thì độ nhạy thu là công suất nhỏ nhất có thể thu được tại một giá trị xác suất lỗi bit BER nào đó của hệ thống. Do vậy, từ (1) độ nhạy thu tính được là:

$$P_s = \frac{B_e}{B_0} P_{ASE} \frac{CNR}{0,5m^2 G} + \left[\left(\frac{B_e}{B_0} P_{ASE} \frac{CNR}{0,5m^2 G} \right)^2 + \frac{4kTB_e}{R} \left(\frac{h\nu}{\eta e} \right)^2 \frac{CNR}{0,5m^2 G} + \frac{B_e}{B_0^2} P_{ASE}^2 (B_0 - B_e/2) \frac{CNR}{0,5m^2 G} \right]^{1/2} \quad (4)$$

trong đó, B_e, B_0 là băng tần điện của bộ thu và băng tần quang của bộ lọc quang sau EDFA; e, k, R, T lần lượt là điện tích electron, hằng số Boltzman, điện trở tải tách sóng và nhiệt độ tuyệt đối; I_{ASE} là dòng photon tạo ra do phát xạ tự phát được khuếch đại sau tách sóng, $I_{ASE} = \Re P_{ASE} = 2\Re n_{sp} h\nu (G-1) B_0$ P_{ASE} là công suất của phát xạ tự phát được khuếch đại; n_{sp}, h, ν, G tương ứng là hệ số phát xạ, hằng số Plank, tần số quang và hệ số khuếch đại của EDFA.

Nếu hệ thống dùng sợi quang có hệ số suy hao α (dB/km), thì khoảng cách truyền dẫn của tuyến thông tin quang M-QAM được tính theo công thức:

$$L = \frac{P_{tx} - P_s}{\alpha} \text{ [km]} \quad (5)$$

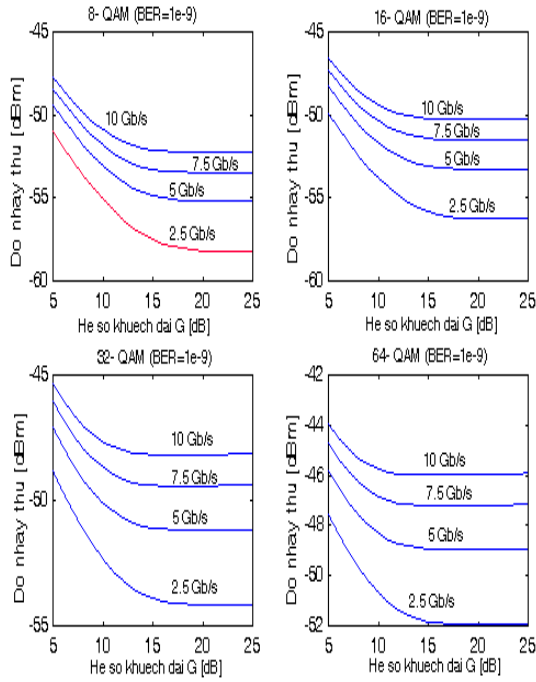
ở đó, P_{tx} là công suất phát đưa vào đầu sợi quang và P_s là độ nhạy thu quang.

III. MỘT SỐ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

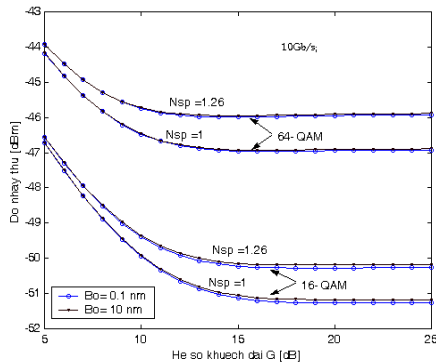
Như vậy ta có nhận xét là độ nhạy thu quang phụ thuộc vào nhiều tham số của hệ thống thông tin quang như: phụ thuộc vào hệ số khuếch đại G của bộ khuếch đại quang, vào băng tần của bộ lọc quang, vào tốc độ bit truyền dẫn, vào dạng điều chế hay vào hệ số tạp âm của bộ khuếch đại quang, v.v... Do vậy, trong thiết kế tính toán tuyến truyền dẫn quang M-QAM có sử dụng khuếch đại quang ta cần phải nghiên cứu sự phụ thuộc của độ nhạy thu và khoảng cách truyền dẫn vào các tham số khác nhau của hệ thống, để từ đó tìm ra tập giá trị tối ưu các tham số của hệ thống mà vẫn đảm bảo chất lượng truyền tin. Với mục đích đó, trong phần này chúng tôi mô phỏng sự phụ thuộc của độ nhạy thu quang và khoảng cách truyền dẫn của tuyến vào một số tham số khác nhau của hệ thống.

Trên hình 2 là kết quả mô phỏng cho sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào hệ số khuếch đại G của EDFA với các tốc độ bit khác nhau và cho hệ thống điều chế M-QAM có các mức điều chế $M=8, 16, 32$ và 64 tương ứng. Các tham số được sử dụng trong mô phỏng này là:

$R=50\Omega$, $T=300^0K$, $B_0=1GHz$, $\lambda=1550nm$, $m=0,2$; $\Re=0,8A/W$, xác suất lỗi bit $BER=10^{-9}$.



Hình 2. Sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào G với tốc độ bit khác nhau

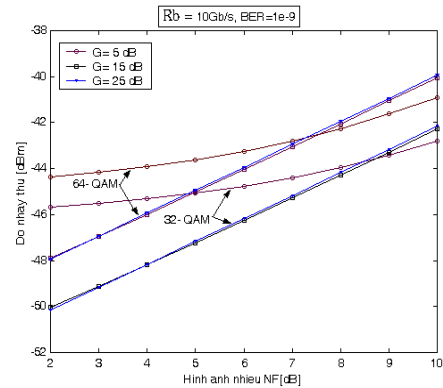


Hình 3. Sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào G với băng tần quang và N_{sp} khác nhau

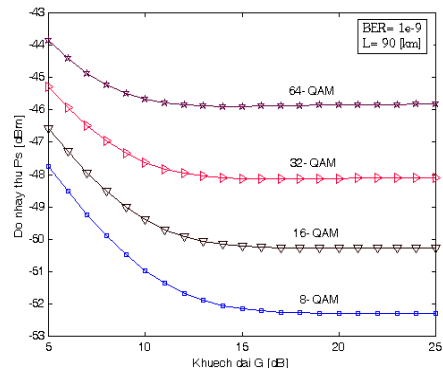
Kết quả mô phỏng cho thấy, độ nhạy thu đạt được giá trị cao khi giá trị của hệ số khuếch đại G tăng; tuy nhiên nó lại tỷ lệ nghịch với tốc độ bit, khi tốc độ bit tăng thì độ nhạy thu bị giảm xuống. Độ nhạy thu đạt được các giá trị cao như -50dBm , -49dBm , -47dBm và -46dBm cho các tốc độ bit $2,5\text{ Gb/s}$, 5 Gb/s , $7,5\text{ Gb/s}$ và 10 Gb/s . Đồng thời ta cũng có nhận xét là giá trị độ nhạy thu không tăng và đạt đến bão hòa nếu như hệ số khuếch đại G của EDFA tăng quá một giá trị giới hạn nào đó. Điều này có thể được giải thích như sau: khi G tăng thì công suất tín hiệu sau tách sóng quang tăng theo, nhưng khi đó cũng làm tăng các thành phần tạp

âm tác động lên hệ thống, làm cho tổng công suất tạp âm sau tách sóng quang cũng tăng theo. Tỷ số tín hiệu trên tạp âm của hệ thống, do đó, sẽ không tăng được nữa và đạt đến giá trị bão hòa.

Sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào hệ số khuếch đại G với hệ số tạp âm NF và băng tần của bộ lọc quang B_0 khác nhau được mô phỏng trên hình 3. Ta thấy rằng, băng tần của bộ lọc quang B_0 có ảnh hưởng rất ít đến độ nhạy thu; trong khi, hệ số bức xạ tự phát N_{sp} lại có ảnh hưởng lớn đến giá trị của độ nhạy thu. Ví dụ dùng phương pháp điều chế $M=64$, thì giá trị của độ nhạy thu sẽ giảm gần 2 dB khi N_{sp} tăng từ $N_{sp}=1$ đến giá trị $N_{sp}=1,26$.



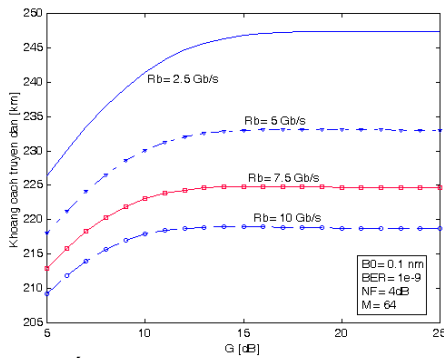
Hình 4. Sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào NF với số mức điều chế khác nhau



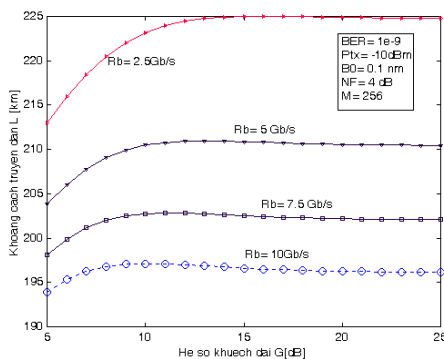
Hình 5. Sự phụ thuộc của độ nhạy thu vào G và với M khác nhau

Ngoài ra, độ nhạy thu còn phụ thuộc vào các tham số khác của hệ thống như hệ số tạp âm NF của bộ khuếch đại và số mức điều chế M . Hình 4 và hình 5 mô phỏng mối quan hệ giữa độ nhạy thu của hệ thống với NF của bộ khuếch đại và với hệ số khuếch đại G khi hệ thống sử dụng các phương pháp điều chế khác nhau. Kết

quả mô phỏng cho thấy giá trị của độ nhạy thu sẽ giảm nhanh khi NF tăng, điều này là do khi NF tăng thì các thành phần tạp âm bức xạ tự phát được khuếch đại tăng, làm giảm tỷ số tín hiệu trên tạp âm sau tách sóng quang và ảnh hưởng mạnh đến độ nhạy thu. Ví dụ với hệ thống 64-QAM như được chỉ ra trên hình 4, tại $G = 25\text{dB}$, giá trị của độ nhạy thu đạt được là -46 dBm khi $\text{NF}=4\text{ dB}$; tuy nhiên khi NF tăng đến 8 dB thì độ nhạy thu lúc này chỉ là -42dBm . Mặt khác, khi số mức điều chế tăng thì hiệu suất băng thông sẽ tăng nhưng lại làm cho độ nhạy thu giảm xuống như được chỉ ra trên hình 5; ví dụ tại $M=16$ và $G=5\text{dB}$ giá trị độ nhạy thu đạt được $-46,5\text{ dBm}$; tuy nhiên khi số mức điều chế M tăng lên đến 64 thì độ nhạy thu lúc này chỉ đạt -44dBm . Do đó, khi thiết kế hệ thống truyền tín hiệu M-QAM thì nhà thiết kế phải cân nhắc tính toán giữa các tham số: khoảng cách truyền dẫn, độ nhạy thu quang, hệ số khuếch đại G và số mức điều chế được sử dụng để đảm bảo được chất lượng truyền dẫn yêu cầu.



Hình 6. Mối quan hệ giữa khoảng cách tuyến và G với $M=64$

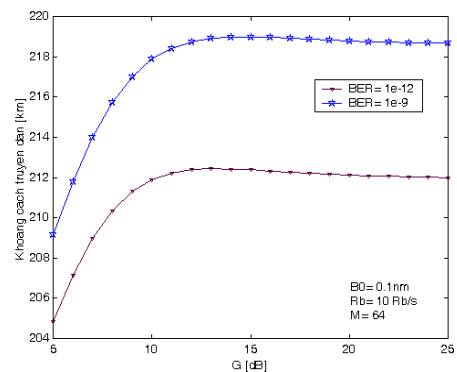


Hình 7. Mối quan hệ giữa khoảng cách tuyến và G với $M=256$

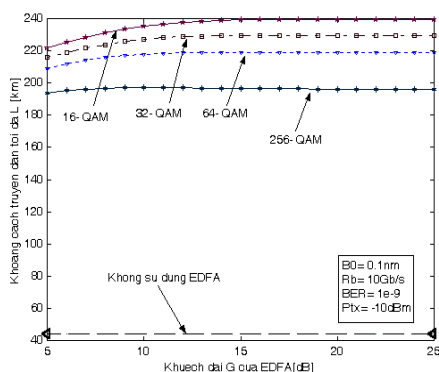
Một trong những tham số quan trọng cần quan tâm khi thiết kế tuyến là khoảng cách

truyền dẫn của tuyến; bởi với một khoảng cách tuyến truyền dẫn cho trước, nhà thiết kế cần chọn các tham số khác của hệ thống để đảm bảo được chất lượng truyền tin yêu cầu hay với một tập các tham số cho trước thì ta cần phải tính toán được xem là khoảng cách truyền dẫn cực đại có thể đạt được là bao nhiêu với một giá trị BER cho trước. Trên hình 6 và hình 7 là mối quan hệ giữa khoảng cách truyền dẫn của tuyến và hệ số khuếch đại G của EDFA với các tốc độ bit 2,5 Gb/s, 5 Gb/s, 7,5 Gb/s và 10 Gb/s tương ứng, kết quả mô phỏng cho hai hệ thống 64-QAM và 256-QAM, với $\text{BER}=10^{-9}$. Rõ ràng khi tốc độ bit tăng thì khoảng cách truyền dẫn của tuyến sẽ bị giảm xuống; ví dụ tại tốc độ bit 2,5 Gb/s, khoảng cách truyền cực đại có thể đạt được 225 km cho hệ thống 64-QAM và 212 km cho hệ thống 256-QAM, tại $G=5\text{dB}$; tuy nhiên khi tốc độ bit tăng đến 10 Gb/s thì khoảng cách chỉ còn là 210 km cho hệ thống 64-QAM và 195 km cho hệ thống 256-QAM với cùng một giá trị G như trên.

Ta thấy rằng, yêu cầu về tỷ lệ lỗi bit BER của hệ thống có ảnh hưởng rất lớn đến độ nhạy thu cũng như khoảng cách truyền dẫn của tuyến và yêu cầu về chất lượng của hệ thống thông tin càng cao thì khoảng cách truyền dẫn cực đại của hệ thống càng nhỏ. Kết quả mô phỏng mối quan hệ giữa khoảng cách truyền dẫn của tuyến 64-QAM với hệ số khuếch đại G của EDFA cho hai hệ thống có yêu cầu tỷ lệ lỗi bit BER tương ứng là 10^{-9} và 10^{-12} được chỉ ra trên hình 8. Ta thấy khi yêu cầu chất lượng của hệ thống truyền tin cao, giả sử từ $\text{BER}=10^{-9}$ đến giá trị $\text{BER}=10^{-12}$ thì khoảng cách truyền dẫn sẽ giảm khoảng 10 km tại tốc độ bit $R_b=10\text{Gb/s}$.



Hình 8. Mối quan hệ giữa khoảng cách tuyến và G với BER khác nhau



Hình 9. So sánh hệ thống có và không có khuếch đại quang EDFA.

Để tăng khoảng cách truyền dẫn của tuyến cũng như độ nhạy thu quang, người ta thường dùng bộ khuếch đại quang EDFA làm tiền khuếch đại. Hình 9 so sánh khoảng cách truyền dẫn tối đa có thể đạt được của các hệ thống: có và không sử dụng bộ khuếch đại quang và các hệ thống có số mức điều chế M khác nhau. Với hệ thống không có sử dụng khuếch đại quang EDFA thì khoảng cách truyền dẫn cực đại chỉ đạt khoảng 40 km tại $BER = 10^{-9}$, trong khi hệ thống có sử dụng

khuếch đại quang thì khoảng cách truyền dẫn sẽ tăng hơn nhiều và có thể đạt đến 190 km cho hệ thống 256-QAM hay thậm chí là 220 km cho hệ thống 16-QAM. Như vậy hệ thống sử dụng khuếch đại quang sẽ có khoảng cách truyền dẫn lớn hơn hẳn so với hệ thống không sử dụng bộ khuếch đại quang.

IV. KẾT LUẬN

Trong thiết kế tính toán tuyến truyền dẫn quang M-QAM, khoảng cách truyền dẫn và độ nhạy thu quang là hai tham số rất quan trọng cần được nghiên cứu. Hai giá trị này phụ thuộc vào nhiều tham số khác nhau của hệ thống như hệ số khuếch đại G, phương pháp điều chế được sử dụng hay hệ số tạp âm NF của bộ khuếch đại. Bài báo đã khảo sát sự phụ thuộc của độ nhạy thu quang và khoảng cách truyền dẫn của tuyến thông tin quang M-QAM vào một số tham số của hệ thống. Các kết quả này có thể được dùng để thiết kế tuyến thông tin quang truyền tín hiệu M-QAM đảm bảo giá trị BER theo yêu cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Trần Đức Hân, Trần Quốc Dũng, Lê Trung Thành, Đào Ngọc Nam; Phương pháp tính toán công suất bù BER trong hệ thống truyền dẫn quang; Tạp chí BCVT, Chuyên san các Công trình nghiên cứu triển khai VT và CNTT, Số 11, 3/2004.
2. Lê Trung Thành; Nghiên cứu việc đánh giá chất lượng truyền dẫn tín hiệu video được điều chế bằng phương pháp M-QAM qua tuyến thông tin quang có sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA; Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, 5/2004.
3. Lê Trung Thành; So sánh hoạt động của các hệ thống thông tin quang M-QAM có sử dụng bộ khuếch đại quang; Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, Trường ĐHGTVT, Số 8, tháng 9/2004.
4. Lê Trung Thành; Phương pháp tính công suất bù BER thiết kế các hệ thống truyền tín hiệu M-QAM qua tuyến thông tin cáp sợi quang; Tạp chí Khoa học – Công nghệ trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, T.XX, No.3, 2004.
5. Roberto Sabella; Performance analysis of wireless broadband systems employing optical fiber link; IEEE Transactions on communications, pp.715-721, vol.47, No.5, May 1999
6. Vu Van San, Hoang Van Vo; Accurate Estimation of Receiver sensitivity for 10 Gb/s optically amplified systems; Optic Communication Journal, Amsterdam, The Netherlands, Vol.181, July, 2000.
7. A. Pappert, D. Lafaw; Performance evaluation of a 64-QAM microwave fiber optic link with a remote external modulator. Proceedings of the Seventh Annual DARPA symposium on Photonic systems for antenna applications, 13-16, Jan., 1997.

Địa chỉ liên hệ: Trần Đức Hân - Tel: (04) 3853.2909
Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội