

GIẢI PHÁP THỰC NGHIỆM NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG TRUYỀN DẪN TÍN HIỆU INTERNET TRÊN MẠNG TRUYỀN HÌNH CÁP HFC (HYBRID FIBER COAXIAL)

PRACTICAL MEASURES FOR ENHANCING THE TRANSMISSION QUALITY OF THE INTERNET SIGNAL ON THE HFC TELEVISION DISTRIBUTION NETWORK

Hoàng Dũng, Trần Duy Chung, Cao Nguyễn Khoa Nam

Trường Cao đẳng Công nghệ, Đại học Đà Nẵng;
hdung@dct.udn.vn; tdchung@dct.udn.vn; cnknam@dct.udn.vn

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp thực nghiệm xử lý và nâng cao chất lượng truyền dẫn tín hiệu Internet trên mạng truyền hình cáp HFC (Hybrid Fiber Coaxial) sử dụng kỹ thuật OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing). Kỹ thuật này chia kênh truyền thành N kênh con, biến đổi luồng dữ liệu tốc độ cao thành các luồng dữ liệu song song. Sau đó, tác giả khảo sát mô hình mạng truyền hình cáp HFC trên thực tế, từ đó đề xuất phương pháp tính toán xử lý các thông số như công suất tín hiệu internet từng kênh đưa vào tuyến, thông số suy hao của các phần tử tích cực tương ứng với số lượng kênh khác nhau. Kết quả này có thể được sử dụng trong công tác thiết kế tuyến nhằm nâng cao dung lượng mà vẫn đảm bảo chất lượng tín hiệu truyền dẫn.

Từ khóa - mạng truyền hình cáp; HFC; GPON; OFDM; CMTS; QAM; chất lượng tín hiệu internet.

Abstract - This paper aims to evaluate and improve the quality of Internet signal transmission based on a HFC (Hybrid Fiber Coaxial) network using OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) technique and carrier technical reuse. The OFDM technique divides a channel into N channels and makes them change from high-speed data stream to parallel data streams. This paper will also investigate a HFC network model in practice to develop a way that helps optimize the calculation of parameters such as Internet signal power per channel, calibration of signal amplification level and attenuation of the active element on different channels. This proposed method can be applied to network design and stream capacity enhancement while the transmission signal quality is still dependable

Key words - Cable television; HFC; GPON; OFDM; CMTS; QAM; Internet transmission quality.

1. Đặt vấn đề

FTTx GPON là dịch vụ sử dụng công nghệ băng thông rộng mới nhất trên thế giới mà các nhà cung cấp dịch vụ đang hướng tới nhằm đáp ứng xu thế nhiều dịch vụ trên một kết nối. FTTx GPON có thể hỗ trợ đa dịch vụ trên một đường dây duy nhất với băng thông đến mỗi thuê bao có thể lên đến 2,5 Gbps, đáp ứng hoàn toàn các nhu cầu phát sinh của khách hàng trong tương lai như: VoIP, Video On Demand, IPTV, truyền số liệu, MPLS, ... Dịch vụ FTTx GPON không bị suy giảm chất lượng tín hiệu theo khoảng cách khách hàng có thể lướt web và sử dụng nhiều dịch vụ truyền hình với tốc độ khá cao trên công nghệ Cable Modem.

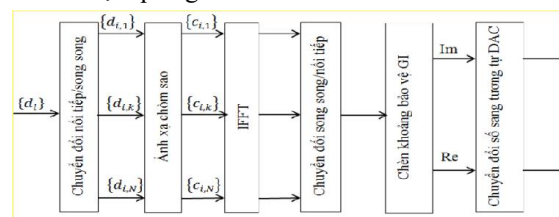
Sau khi đã khảo sát và nghiên cứu một mô hình truyền hình cáp thực tế (tại Công ty Truyền hình cáp Sông Thu), trong đó dịch vụ truyền hình và internet được truyền đi trên hai đường truyền dùng cáp HFC nhưng hoàn toàn độc lập với nhau, nhóm tác giả đã đề xuất ghép chung hai đường truyền tín hiệu này trên cùng một đường dẫn truyền hình cáp HFC, kèm theo việc đề xuất phương pháp tính toán xử lý nhằm nâng cao chất lượng truyền dẫn tín hiệu internet trên từng kênh đưa vào tuyến, cân chỉnh tín hiệu thu và phát ở các cấp khuếch đại tương ứng với số lượng kênh khác nhau, nhằm phục vụ cho khách hàng sử dụng một đường truyền gồm cả hai dịch vụ là truyền hình và internet có chất lượng tốt nhất.

2. Cơ sở về truyền dẫn OFDM được áp dụng vào mạng HFC

2.1. Điều chế và giải điều chế tín hiệu OFDM trong miền RF [3]

Trong quá trình phát tín hiệu của tín hiệu OFDM đầu vào là dòng dữ liệu $\{d_i\}$ được chia thành dòng dữ liệu song song với tốc độ dữ liệu giảm đi N lần thông qua bộ chuyển đổi nối tiếp/song song. Dòng bit trên mỗi luồng dữ liệu $\{d_i, k\}$

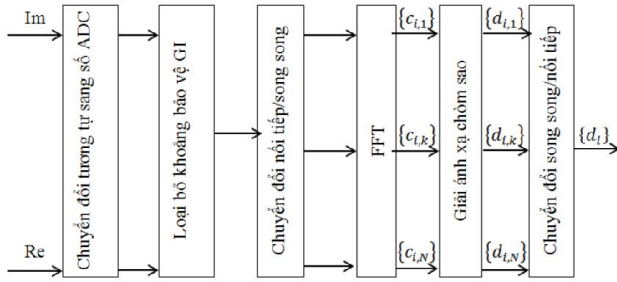
được ánh xạ thành tín hiệu phức $\{c_i, k\}$, với k là chỉ số sóng mạng con. Các tín hiệu phức này được đưa vào ngõ vào của bộ IFFT (Invert Fast Fourier Transform). Ngõ ra bộ IFFT chính là tín hiệu OFDM trong miền thời gian, tín hiệu này sau đó được chuyển đổi từ song song sang nối tiếp, chèn khoảng bảo vệ. Phần thực và phần ảo của tín hiệu phức được chuyển thành tín hiệu tương tự thông qua bộ chuyển đổi số tương tự DAC (Digital to Analog Converter), sau cùng mỗi phần thực và phần ảo được đưa vào hai bộ điều chế quang MZM (Mach-Zehnder-Modulator) để chuyển thành tín hiệu quang.



Hình 1. Sơ đồ quá trình phát tín hiệu của một hệ thống OFDM trong miền RF [2]

Trong quá trình thu tín hiệu của tín hiệu OFDM, quá trình thực hiện ngược lại so với phía phát tín hiệu OFDM. Các thành phần thực và ảo (I/Q) sau khi được dò bởi bộ tách sóng quang, sẽ được chuyển về dạng số nhờ các bộ chuyển đổi tương tự sang số (ADC). Hai thành phần thực và ảo này được ghép lại thành một số phức duy nhất. Dòng tín hiệu sau đó được chuyển từ nối tiếp sang song song nhờ sử dụng bộ đệm (buffer). Tín hiệu được bỏ khoảng bảo vệ, đưa vào ngõ vào bộ FFT (Fast Fourier Transform). Tín hiệu sau bộ FFT là tín hiệu rời rạc ở miền tần số, được giải điều chế ở băng tần cơ sở và chuyển chuỗi bit nhận được về dạng nối tiếp nhờ bộ chuyển đổi song song sang nối tiếp. Chuỗi bit nhận được ở

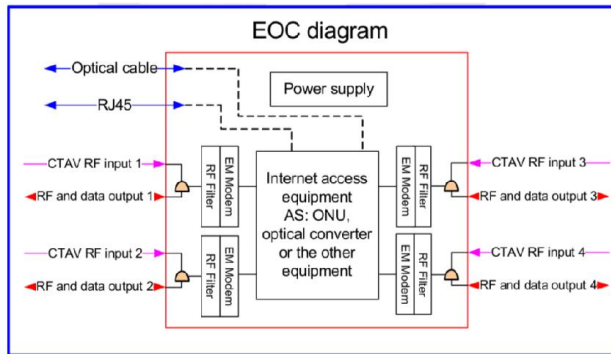
dạng nổi tiếp này chính là chuỗi bit ở phía phát (dữ liệu).



Hình 2. Sơ đồ quá trình thu tin của một hệ thống OFDM trong miền RF [2]

2.2. Sơ đồ khối của EoC

Sơ đồ khối EoC được dùng trong hệ thống truyền dẫn internet trong mạng HFC sử dụng trong nghiên cứu của tác giả được trình bày trên Hình 3 [2]:



Hình 3. Sơ đồ khối EoC (EM90)

EM90 là một thiết bị kết nối truy cập dữ liệu băng thông rộng trên hạ tầng truyền hình cáp CATV, nó có 4 cổng tín hiệu RF đầu vào và 4 cổng tín hiệu RF đầu ra. Các cổng RF vào sẽ là nơi nhận tín hiệu CATV (87MHz đến 1000MHz) từ node quang CATV, tín hiệu này sẽ được trộn cùng một băng các mạch trộn với luồng tín hiệu tần số thấp (từ 5MHz đến 30MHz) được phát ra từ module Master. Khi đó tín hiệu lấy ra từ 4 cổng RF ra (gồm tín hiệu một chiều CATV và tín hiệu hai chiều internet) sẽ đi về 4 nhánh tín hiệu trong hệ thống mạng CATV. Ngoài ra EM90 còn có một khối truy cập dữ liệu Ethernet quang (hoặc RJ45) và một khối chuyển đổi nguồn AC (60V) sang DC (12V).

Hệ thống giải mã tín hiệu sẽ truyền các dữ liệu từ Internet tải xuống PC (Downstream data) với tần số 6 MHz. Do vậy trên đường truyền các dữ liệu này giống hệt các tín hiệu TV, nó được xem như một kênh riêng biệt. Các dữ liệu được gửi từ PC lên Internet (Upstream data) đòi hỏi băng thông hẹp hơn, chỉ 2 MHz, điều này giải thích cho việc tốc độ tải xuống (Download) luôn nhanh hơn tải lên (Upload). Để truyền tải cả các dữ liệu lên và xuống trên cùng đường cáp TV đòi hỏi hai thiết bị riêng biệt: Giải mã cáp cho phía người sử dụng và Cable Modem Termination System (CMTS) cho phía nhà cung cấp.

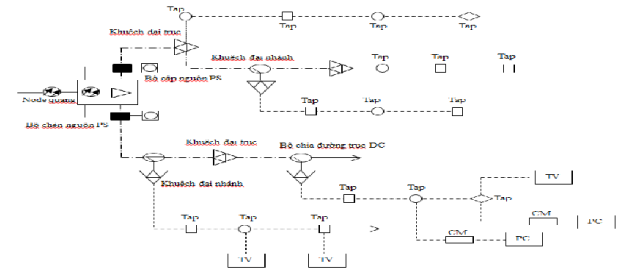
3. Đặc điểm kỹ thuật truy cập EoC (Ethernet over Coaxial)

Đây là công nghệ truyền dẫn tín hiệu internet hai chiều dựa vào mạng truyền hình cáp HFC có những tính năng và

ưu điểm như sau:

- Áp dụng tiêu chuẩn Home Plug, sử dụng trên mạng HFC với dải tần từ 5MHz – 30MHz.
- Sử dụng kỹ thuật OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), có khả năng chống nhiễu giao thoa cao, tận dụng tối đa hiệu quả về băng thông [4].
- Khả năng đáp ứng tốc độ truyền dẫn của mỗi module chính là cao hơn so với công nghệ CMTS.
- Sử dụng mạng truyền hình cáp HFC có sẵn, không cần thiết phải xây dựng mạng mới.
- Thiết bị đầu cuối không cần phải cấu hình.
- Có thể phù hợp với các mạng HFC có chất lượng khác nhau, phát triển kinh doanh nhanh chóng.
- Chi phí giá thành thiết bị thấp.
- Thực hiện dự án triển khai hệ thống nhanh chóng, đơn giản.
- Phù hợp với mạng dữ liệu được cung cấp bởi các đầu nối quang, hoặc thiết bị ONU.

4. Sơ đồ khối truyền dẫn internet trong mạng HFC và các kết quả kiểm chứng từ thực tế [2]



Hình 4. Mô hình mạng HFC CATV [2]

4.1. Mạng truyền hình cáp HFC được khảo sát và nghiên cứu trong thực tế

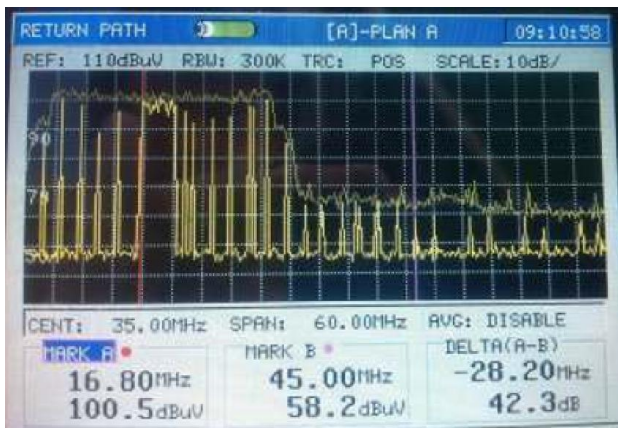
Mạng truyền hình cáp HFC mà nhóm tác giả khảo sát và nghiên cứu trong thực tế cho thấy có một số tồn tại như sau:

- Hệ thống mạng truyền hình cáp HFC đang hoạt động đã phát triển hơn 10 năm, được cải tạo thường xuyên, nhưng do điều kiện về địa hình nên việc quy hoạch mạng lưới chưa được tối ưu.
- Thiết kế mạng ban đầu chưa tính đến việc phát triển thêm mạng EoC, nên phải mất nhiều công sức cải tạo để đáp ứng công nghệ.
- Các node quang luôn ở trạng thái quá tải vì số lượng khách hàng ngày càng tăng, việc sử dụng rất nhiều bộ chia trên nhánh trực và nhánh rẽ (2-Way, 3-Way, 4-Way) sẽ làm tăng thêm độ suy hao của tín hiệu, khoảng cách giữa các bộ khuếch đại và giữa các đầu nối mất cân bằng, cũng tạo ra nhiều cấp suy hao tín hiệu và một lượng nhiệt lớn gây nhiều khó khăn cho việc cân chỉnh tín hiệu EoC.
- Nguồn nuôi chỉ cung cấp cho các nhánh và các node quang, không đủ để cung cấp cho mạng EoC.

4.2. Xử lý và nâng cao chất lượng đường truyền trên các nhánh tín hiệu

Trước khi xử lý chất lượng truyền dẫn trên các nhánh

tín hiệu, chúng ta phải đảm bảo kết nối từ EM90 lên hệ thống GPON là bình thường, công suất phát ra của EM90 là đủ. Theo nhà sản xuất, công suất phát ra của EM90 là 110dBμV, nhưng thực tế rất nhiều EM90 có công suất phát ra 105dBμV (Hình 5):



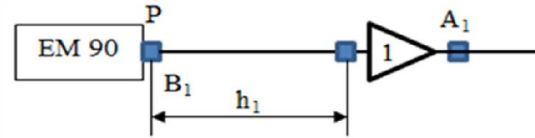
Hình 5. Phổ tần phát ra của EM90

Chúng ta có các phân đoạn xử lý sau: Rõ ràng khi trực chính của nhánh tín hiệu có vấn đề thì số lượng thuê bao chịu ảnh hưởng là khá nhiều. Theo tiêu chuẩn của nhà sản xuất thì thiết bị EM90 chỉ có thể đáp ứng dịch vụ tốt nhất với nhánh tín hiệu có số bộ khuếch đại nhỏ hơn 3. Với thực tế mạng có nhiều bộ khuếch đại thì EM90 không thể đáp ứng nhu cầu dịch vụ cho tất cả các đầu cuối trong nhánh tín hiệu. Để ý tới các bộ chia 2-Way, 3-Way và 4-Way đang dùng trên hạ tầng, rõ ràng với mức suy hao từ 4.6dBμV đến 10dBμV của các bộ chia này thì chúng phải tương ứng với một cấp khuếch đại [1]. Với càng nhiều cấp khuếch đại, tín hiệu EoC đương nhiên sẽ suy giảm công suất, nhưng một ảnh hưởng nghiêm trọng khác là với sự có mặt của nhiều phân tử tích cực này sẽ làm cho lượng nhiệt nhiều, nhiều do phối hợp quá tải, làm ảnh hưởng lớn tới phẩm chất của tín hiệu, làm giảm tỉ số SNR (Signal to Noise Ratio). Theo lý luận như trên, thì nguyên tắc xử lý tín hiệu trên trục chính là điều chỉnh sao cho số cấp khuếch đại giảm nhiều càng tốt, nhưng vẫn cân bằng được tín hiệu và đảm bảo được chất lượng dịch vụ CATV. Để thực hiện điều này, tốn khá nhiều thời gian và công sức, nhưng để đảm bảo dịch vụ EoC được sử dụng với chất lượng tốt nhất nên chúng ta bắt buộc phải làm. Hầu hết các node tín hiệu của mạng HFC đều có trên 15 bộ khuếch đại, tương ứng với mỗi nhánh có trên 4 bộ khuếch đại (đây là chưa kể các bộ chia). Vì vậy điều tiên quyết đầu tiên, là phải thực hiện việc chia tách các node này, sao cho số cấp khuếch đại phải nhỏ hơn 3 [1].

Nội dung dưới đây trình bày việc cân chỉnh theo từng cấp khuếch đại từ cấp thứ 1 đến cấp thứ 2 rồi đến cấp thứ 3 (với giả thiết 3 bộ khuếch đại nối trực tiếp với nhau, không qua bộ chia).

Cân chỉnh tín hiệu ở cấp khuếch đại thứ nhất: Như đã nói ở trên, trước khi cân chỉnh tín hiệu trên nhánh, cần đảm bảo mức công suất phát ra của EM90 xấp xỉ ngưỡng 105 dBμV. Ngoài ra cần nắm các thông số suy hao của các phần tử tích cực, sơ đồ thực tế của hạ tầng mạng, thông số của các loại cáp đồng trục (lưu ý trên trục chính của nhánh tín hiệu tốt nhất là chỉ dùng loại cáp QR540).

Trước hết tiến hành đo kiểm đầu ra của bộ khuếch đại, nhận được thông số đo là mức công suất của tín hiệu thu được, giả sử là A_1 .



Hình 6. Cấp khuếch đại thứ nhất của EM90

Từ công suất đo và theo sơ đồ như trên Hình 6, tiến hành ngược công suất về phía đầu nối là đầu ra của EM90 theo công thức (1) [2] và giả sử công suất có được tại điểm này là B_1 :

$$A_1 + 7 + \left(h_1 \times \frac{1,2}{100}\right) + 1,5 = B_1 \quad (1)$$

trong đó:

h_1 là khoảng cách từ EM90 đến bộ khuếch đại thứ nhất.

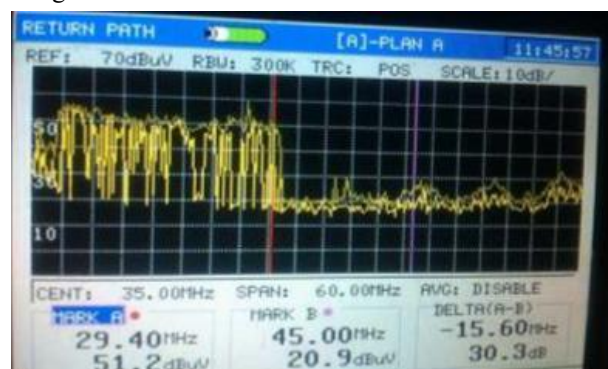
7dB là mức suy hao tín hiệu internet khi qua một bộ khuếch đại (vì bộ khuếch đại chỉ khuếch đại tín hiệu truyền hình cáp ở tần số 80MHz đến 1000MHz, còn tín hiệu internet ở tần số 5MHz đến 30MHz lại bị suy hao 7dB) [2]

1,2/100 là mức độ suy hao (1,2dB) của tín hiệu có tần số 30MHz qua 100m cáp QR540

1,5dB là tổng mức độ suy hao trên 3 đầu nối trên trục chính của cáp QR540, từ đầu ra RF của EM90 tới đầu ra RF của bộ khuếch đại thứ 1 (mỗi đầu nối có mức suy hao 0,5dB).

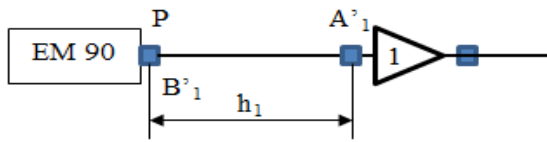
Về mặt lý thuyết thì công suất phát ra sẽ đúng bằng công suất của đầu nối cuối trong nhánh cộng với các suy hao trên đường truyền và các đầu nối thành phần của nhánh đó [2], do vậy nếu B_1 xấp xỉ bằng mức công suất P ở đầu ra của EM90 thì tín hiệu nhận được là đủ, còn nhỏ hơn P thì cần thực hiện bước cân chỉnh tiếp theo.

Thực nghiệm đo được theo Hình 7 dưới đây: Tại đầu ra của bộ khuếch đại thứ nhất, tín hiệu thu được không đủ, với $h_1=150m$ nhưng giá trị A_1 ở đây chỉ ở mức 51.2dBμV, cho nên theo công thức (1) thì công suất B_1 là 61.5dBμV, thấp hơn tín hiệu công suất vào P là 100.5dBμV (Hình 5), điều này chứng minh rằng tín hiệu internet trên đường truyền không tốt.



Hình 7. Phổ tần tín hiệu đo được tại đầu ra của bộ khuếch đại thứ nhất có chất lượng kém

Bước tiếp theo, tiến hành đo kiểm đầu vào của bộ khuếch đại và nhận được thông số đo là mức công suất của tín hiệu thu được, giả sử là A'_1 .



Hình 8. Sơ đồ tính công suất trước cáp khuếch đại thứ nhất của EM90

Từ công suất đo và theo sơ đồ như trên Hình 8, tiến hành tính ngược công suất về phía đầu nối là đầu ra của EM90 theo công thức (2) [2] và giả sử công suất có được tại điểm này là B'_1 :

$$A'_1 + \left(h_1 \times \frac{1,2}{100}\right) + 1 = B'_1 \quad (2)$$

trong đó:

A'_1 là giá trị công suất thu được tại đầu vào của bộ khuếch đại thứ nhất;

1dB là tổng mức độ suy hao trên 2 đầu nối trên trục chính của cáp QR540 từ đầu ra của EM90 tới đầu vào của bộ khuếch đại thứ 1 (mỗi đầu nối có mức suy hao 0,5dB)

Về mặt lý thuyết thì công suất phát ra sẽ đúng bằng công suất của đầu nối cuối trong nhánh cộng với các suy hao trên đường truyền của nhánh đó [2], do vậy nếu B'_1 xấp xỉ P thì mức thu là đủ, khi đó ta sẽ kiểm tra bộ khuếch đại, còn nếu B'_1 nhỏ hơn P-2 (dBμV) thì chắc chắn chất lượng của đoạn cáp QR540 đã bị hỏng. Lúc đó, chúng ta tìm cách xử lý cáp hoặc thay bằng cáp mới.

Sau khi cân chỉnh xong tín hiệu ở cáp khuếch đại thứ nhất, thì lúc này B_1 đã xấp xỉ bằng P và với cách làm tương tự ta phải đảm bảo sao cho các bộ khuếch đại tiếp theo cũng đáp ứng theo công thức sau:

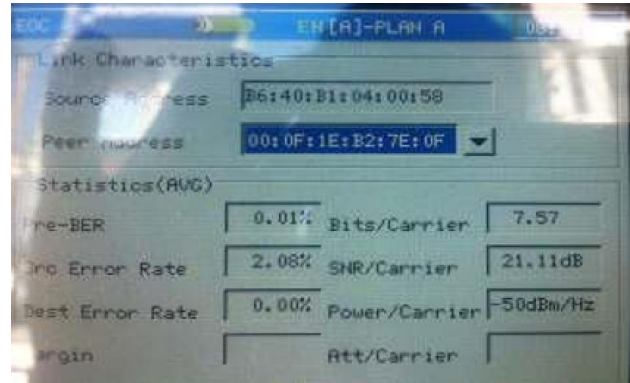
$$B_2 + \left(h_1 \times \frac{1,2}{100}\right) + 1 = B_1 \quad (3)$$

$$B_3 + \left(h_1 \times \frac{1,2}{100}\right) + 1 = B_2 \quad (4)$$

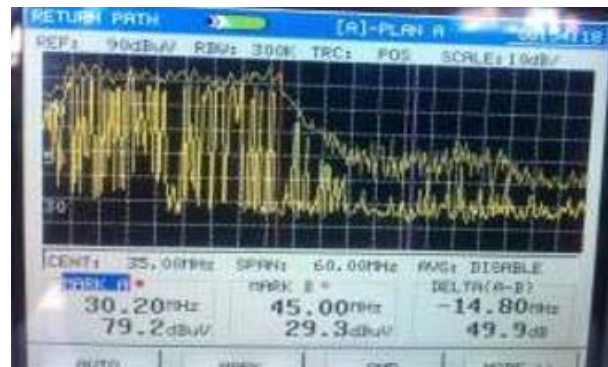
Do dùng thêm các bộ chia 2-Way, 3-Way và 4-Way nên các mức công suất thu kỳ vọng qua các tầng khuếch đại sẽ không đạt được. Thông thường với các nhánh hạ tầng có chất lượng khá tốt thì các giá trị A_1 của nhánh thứ nhất sẽ thay đổi từ 90dBμV đến 95dBμV, A_2 của nhánh thứ hai sẽ thay đổi từ 87dBμV đến 90dBμV, A_3 của nhánh thứ ba sẽ thay đổi từ 79dBμV đến 83dBμV. Có một chỉ số rất quan trọng là SNR/carrier, vì trên trục chính của nhánh tín hiệu mức công suất đang ở giá trị cao nên nó có thể lấn át cả nhiễu, vì thế SNR/carrier luôn lớn hơn hoặc bằng 18dB [5]. Nhưng không vì thế mà chúng ta chủ quan, nếu thực sự có nguồn nhiễu, thì chúng ta phải loại bỏ ngay, vì với nhiễu cộng dồn sẽ tác động rất lớn đến phẩm chất của tín hiệu khi đi về các nhánh và đi về các đầu cuối. Như ví dụ ở trên Hình 7, mức công suất của tín hiệu đo được ở đầu ra RF của bộ khuếch đại thứ nhất không đủ do phối hợp trở kháng, nhưng trên Hình 8 lúc này do mức công suất tín hiệu là khá cao nên ta có thông tin về tín hiệu rất tích cực như sau: SNR/carrier có giá trị 21,11dB, điều này chứng tỏ rằng ở cáp khuếch đại thứ nhất ít chịu tác động bởi nhiễu.

Quá trình xử lý chất lượng tín hiệu trên trục chính và các tuyến rẽ ở nhánh tín hiệu, đảm bảo tín hiệu đến bộ chia có thể cung cấp được dịch vụ. Để có thể cung cấp được dịch vụ tốt nhất thì tín hiệu đo được ở bộ chia có mức công

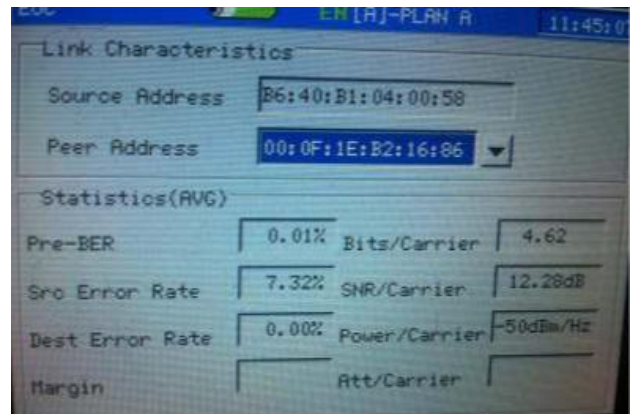
suất lớn hơn 50dBμV, tỉ số SNR lớn hơn 12dB (dựa vào thực tiễn đo kiểm và chất lượng dịch vụ thực tế). Các hình đo được dưới đây biểu hiện chất lượng tín hiệu EoC mà khách hàng có thể sử dụng tốt dịch vụ.



Hình 8. Thông tin về đường truyền đo tại đầu ra của bộ khuếch đại thứ nhất (đường truyền có chất lượng kém)



Hình 9. Phổ tần tín hiệu thu được tại phía khách hàng



Hình 10. Thông tin về đường truyền tín hiệu tương ứng với phổ tần tại phía khách hàng

Tóm lại công tác xử lý trên trục chính của nhánh tín hiệu là tối quan trọng, nó ảnh hưởng rất nhiều đến chất lượng của tín hiệu tới đầu cuối thiết bị, nên phải thực hiện chuẩn xác và với tính hợp lý cao nhất.

Kiểm tra đo đạc và chỉnh sửa chất lượng của tín hiệu ở trước và sau bộ khuếch đại, sao cho tín hiệu phải được đảm bảo cả về công suất, tỉ số SNR/carrier, số bits/carrier (các thông số này hiển thị trên máy đo DS2500E).

5. Kết luận

Bài báo đã đánh giá và nâng cao chất lượng truyền dẫn

tín hiệu internet trên một hệ thống truyền hình cáp HFC có trong thực tế, cung cấp cho 5000 thuê bao mà nhóm tác giả đã khảo sát và nghiên cứu. Tuy việc đo đạc, kiểm tra chỉ mới được thực hiện trên các trục chính của nhánh tín hiệu, nhưng kết quả đo đạc và xử lý chất lượng truyền dẫn đã cho ra các kết quả khả quan, cho thấy phương pháp xử lý và nâng cao chất lượng truyền dẫn được nhóm tác giả đề xuất mang tính thực tiễn cao. Ngoài ra, phương pháp này cũng có thể áp dụng cho toàn hệ thống gồm nhiều nhánh tín hiệu với hàng trăm ngàn thuê bao (lớn hơn), phù hợp với xu thế mở rộng của hệ thống, đáp ứng nhu cầu về thông tin cho người sử dụng dịch vụ. Các kết quả đạt được sẽ giúp cho các nhà thiết kế các hệ thống truyền hình, đặc biệt là hệ thống truyền hình cáp HFC cho tòa nhà cao tầng hoặc các khu chung cư dễ dàng chọn được các tham số thích hợp của hệ thống, thiết bị để đạt được chất lượng dịch vụ theo yêu cầu.

(BBT nhận bài: 03/8/2016, phản biện xong: 29/8/2016)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Tuấn, *Thông tin sợi quang*, Nhà xuất bản Giáo dục Việt Nam, 2010.
- [2] Đặng Lê Khoa, *Thực hiện hệ thống OFDM trên phần cứng*, luận văn tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý vô tuyến và Điện tử, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên TP HCM, 2009.
- [3] Nguyễn Anh Vinh, *Cân bằng tín hiệu điện ở đầu thu trong các hệ thống truyền dẫn quang đường dài*, luận văn tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Vật lý vô tuyến và Điện tử, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên TP HCM, 2009.
- [4] Nguyễn Văn Đức, *Kỹ thuật thông tin số (Tập 2): Lý thuyết và các ứng dụng của kỹ thuật OFDM*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [5] Vũ Văn San, Trần Hoàng Diệu, “Phương pháp tính toán thiết kế cấu hình tuyến thông tin quang sử dụng khuếch đại quang sợi EDFA”, *Kỷ yếu Hội nghị khoa học Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông*, Hà Nội, 2001.