

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ



Đỗ Hải Sơn
Mã học viên: 20025066

BÁO CÁO CUỐI KỲ TRUYỀN THÔNG VÀ TUYẾN NÂNG CAO

Dung năng cho hệ thống đa người dùng

Giảng viên: Phó Giáo sư. Tiến sĩ: Trịnh Anh Vũ

Hà Nội - 2021

Trong các bài toán lý thuyết về viễn thông trước đây, các kỹ thuật TDMA/FDMA, CDMA, OFDM được đề xuất cho hệ truyền thông điểm - điểm. Từ những năm 2000, khi số lượng thiết bị tăng vọt, bài toán truyền thông điểm - điểm trở thành bài toán phục vụ đa người dùng. Trong báo cáo này, tôi sẽ trình bày những hiểu biết của mình về dung năng của một kênh đa người dùng ở cả kênh đường lên (nhiều gửi một nhận) và đường xuống (một gửi nhiều nhận) của một kênh tạp âm trắng (AWGN).

1 Kênh đường lên với tạp âm AWGN

1.1 Dung năng kênh trong trường hợp không có nhiễu liên người dùng

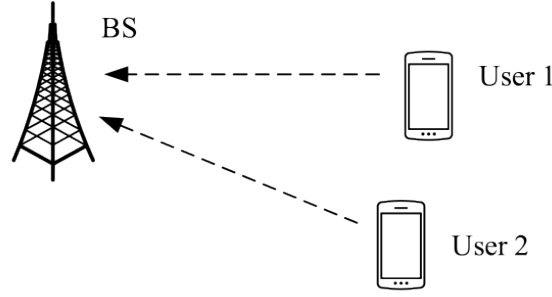


Figure 1: Kênh đường lên gồm 2 người dùng

Xét một mô hình hệ thống như trên hình 1, tín hiệu rời rạc thu được ở trạm cơ sở khi được đưa xuống baseband (băng cơ sở) sẽ có dạng:

$$y[m] = x_1[m] + x_2[m] + w[m] \quad (1)$$

với x_1 và x_2 lần lượt là tín hiệu baseband của người dùng 1 và 2, $w[m] \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ là tạp âm Gauss phức có phân bố i.i.d (đồng nhất và độc lập) trên các kênh truyền khác nhau. Giả sử, người dùng thứ k có ràng buộc công suất phát là P_k J/symbol và tốc độ truyền trung bình tương ứng là R_k (với $k = 1, 2$).

Trong truyền thông đa người dùng, ta sẽ có khái niệm “*dung năng vùng*” C , đây là thông số biểu diễn “tập hợp” các điểm trade-off (trả giá) giữa truyền tin cậy và tốc độ truyền cùng lúc của cặp (R_1, R_2) . Tùy theo mục đích, dung năng vùng có thể chia làm 2 loại như sau [1]:

1. Dung năng đối xứng: cực đại hóa tốc độ truyền khi độ tin cậy cùng lúc của người dùng là bằng nhau (hay tốc độ truyền tất cả người dùng là như nhau).

$$C_{\text{sym}} := \max_{(R, R) \in \mathcal{C}} R \quad (2)$$

2. Dung năng tổng: cực đại hóa tổng tốc độ truyền của các người dùng cùng lúc:

$$C_{\text{sum}} := \max_{(R_1, R_2) \in \mathcal{C}} R_1 + R_2 \quad (3)$$

Để đạt được dung năng vùng, trước hết, R_1 và R_2 phải thỏa mãn 3 điều kiện sau: tốc độ truyền điểm - điểm R_1 và R_2 phải thỏa mãn định lý Shannon về dung năng kênh; tổng tốc độ truyền $R_1 + R_2$ phải nhỏ hơn dung năng của một nguồn điểm - điểm có năng lượng bằng tổng $P_1 + P_2$.

$$\begin{aligned} R_1 &< \log \left(1 + \frac{P_1}{N_0} \right) \\ R_2 &< \log \left(1 + \frac{P_2}{N_0} \right) \\ R_1 + R_2 &< \log \left(1 + \frac{P_1 + P_2}{N_0} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

Tuy nhiên, để đạt được dung năng như phương trình (4), nguồn 1 và 2 phải truyền trong điều kiện nguồn còn lại không tồn tại, và như vậy thì không khả thi trong hệ thống truyền thông đa người dùng. Do đó như đã đề cập ở trên, C là sự trade-off giữa tốc độ truyền của các người dùng cùng lúc (R_1, R_2). Trên lý thuyết, người dùng 1 có thể đạt được tốc độ truyền bằng dung năng như dung năng điểm - điểm như trên hệ bất phương trình (4), và người dùng 2 sẽ có tốc độ truyền như sau:

$$R_2^* = \log \left(1 + \frac{P_1 + P_2}{N_0} \right) - \log \left(1 + \frac{P_1}{N_0} \right) = \log \left(1 + \frac{P_2}{P_1 + N_0} \right) \quad (5)$$

1.2 Successive Interference Cancellation (SIC)

Để đạt được dung năng như trên phương trình (5), kỹ thuật SIC ra đời để bên thu có thể đạt được dung năng vùng. Nguyên lý như sau:

1. Khi bên thu nhận được tín hiệu từ cả hai người dùng 1 và 2. Nó sẽ giải điều chế tín hiệu của người dùng thứ 2 ($x_2[m]$) trước bằng cách coi tín hiệu của người dùng thứ 1 là tạp âm. Từ đó tốc độ truyền cực đại của người dùng 2 có thể đạt như phương trình (5).
2. Lấy tín hiệu thu được trừ đi tín hiệu giải điều chế được của người dùng 2: $y[m] - x_2[m]$, khi này tín hiệu còn lại của người dùng 1 và tạp âm: $x_1[m] + w[m]$.
3. Giải điều chế tín hiệu từ người dùng 1 ($x_1[m]$), do đó tốc độ truyền mà người dùng 1 có thể đạt được là: $R_1 = \log \left(1 + \frac{P_1}{N_0} \right)$.

Sử dụng phương pháp giải mã này ở bên thu, ta sẽ luôn có các điểm dung năng vùng thỏa mã C_{sum} là các điểm trên đường thẳng AB ở hình 2. Trên thực tế, nếu như có 2 tín hiệu, một mạnh (P_2) và yếu (P_1) thì ta sẽ giải điều chế tín hiệu mạnh trước để đạt được tốc độ tối đa ở tín hiệu yếu. Từ đó, ta suy ra rằng chúng ta nên giới hạn năng lượng truyền phát của các người dùng, tùy vào vị trí xa gần trạm BS để kiểm soát tốc độ và năng lượng tốt nhất [1].

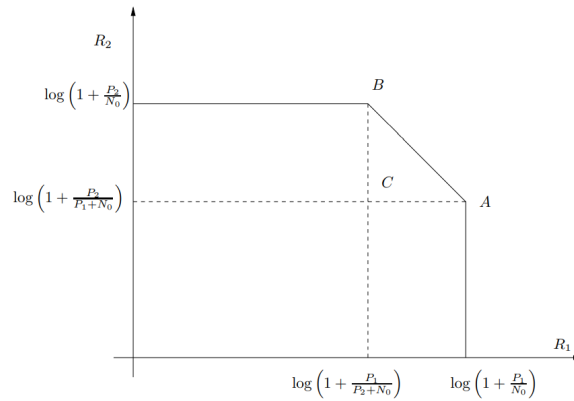


Figure 2: Dung năng vùng trong trường hợp 2 người dùng

1.3 So sánh SIC với CDMA/OFDM

1.3.1 SIC vs CDMA

Trong kỹ thuật CDMA, mỗi người dùng mã hóa tín hiệu gửi của mình với một đoạn mã khóa khác nhau, và cũng dùng chung một dải tần số hoạt động. Phía thu sẽ giải mã để tách ra tín hiệu của từng người dùng dựa trên mã khóa của người dùng đó và tín hiệu của các người dùng khác được coi là nhiễu. Do vậy tốc độ cùng lúc trong trường hợp chỉ có 2 người dùng sẽ đạt điểm C trên hình 2.

$$R_k = \log \left(1 + \frac{P_k}{\sum_{i=1}^{k-1} P_i + N_0} \right) \quad (6)$$

Xét ví dụ phía bên trái hình 3, như mức SNR giữa hai người dùng quá chênh lệch, dung năng vùng của CDMA (R_1, R_2) sẽ đạt điểm C, sự chênh lệch là quá lớn giữa hai người dùng. Có thể kiểm soát công suất của người dùng một bằng người dùng hai, khi đó tốc độ đạt điểm D, tuy bằng nhau và lớn hơn điểm C, nhưng do SNR thấp nên tốc độ truyền cả hai đều cùng rất thấp.

1.3.2 SIC vs OFDM

SIC trade-off tốc độ truyền của các người dùng dựa trên time-sharing, còn OFDM có thể phân chia các người dùng cùng lúc theo frequency-sharing, hay hiểu đơn giản là mỗi người dùng có một số lượng sóng mang con trực giao nhất định. Giả sử người dùng 1 được chia α bậc tự do và người dùng 2 còn $(1 - \alpha)$ bậc tự do trên tổng số băng thông W , từ đó năng lượng phát bị chia mảnh, tương ứng là P_1/α và $P_2/(1 - \alpha)$. Tốc độ truyền tối đa của 2 người dùng lần lượt là:

$$R_1 = \alpha W \log \left(1 + \frac{P_1}{\alpha N_0} \right) \quad \text{bits/s.} \quad (7)$$

$$R_2 = (1 - \alpha) W \log \left(1 + \frac{P_2}{(1 - \alpha) N_0} \right) \quad \text{bits/s.} \quad (8)$$

Như phía bên phải hình 3, chỉ có duy nhất một điểm khi $\alpha = P_1/(P_1 + P_2)$ là tốc độ OFDM đạt được dung năng vùng, các điểm khác đều cho kết quả không nằm trên đường AB. Hơn nữa khi có chênh lệch lớn giữa SNR của hai nguồn, tuy đạt dung năng nhưng tốc độ truyền của người dùng SNR thấp gần như không có dẫn đến sự không công bằng trong việc truyền tải, tương tự như kỹ thuật CDMA.

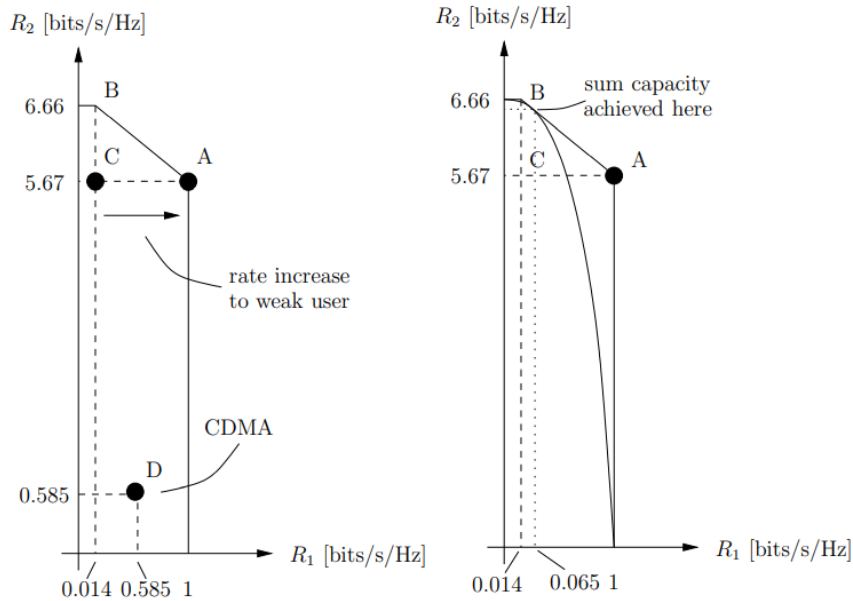


Figure 3: Dung năng khi sử dụng CDMA và OFDM với $P_1/N_0 = 0$ dB và $P_2/N_0 = 20$ dB

1.4 Tổng quát hóa K người dùng trên kênh đường lên

Khi tổng quát hóa bài toán đến K người dùng, tốc độ truyền của K thiết bị cần thỏa mãn $2^K - 1$ điều kiện tương ứng với từng tập nhóm người dùng truyền như trên hệ bất phương trình (4).

$$\sum_{k \in \mathcal{S}} R_k < \log \left(1 + \frac{\sum_{k \in \mathcal{S}} P_k}{N_0} \right) \quad \text{for all } \mathcal{S} \subset \{1, \dots, K\} \quad (9)$$

Tương tự như hệ 2 người dùng, tổng tốc độ truyền tối đa của hệ thống có thể đạt:

$$C_{\text{sum}} = \log \left(1 + \frac{\sum_{k=1}^K P_k}{N_0} \right) \quad \text{bits /s/Hz} \quad (10)$$

Trong trường hợp, công suất của K người dùng bằng nhau và bằng P , ta có dung năng dung năng tổng và đối xứng đạt:

$$\begin{aligned} C_{\text{sum}} &= \log \left(1 + \frac{KP}{N_0} \right) \\ C_{\text{sym}} &= 1/K \cdot \log \left(1 + \frac{KP}{N_0} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Nếu sử dụng kỹ thuật CDMA, tổng quát hóa phương trình (6), ta có dạng:

$$\begin{aligned} &K \cdot \log \left(1 + \frac{P}{(K-1)P + N_0} \right) \quad \text{bits /s/Hz} \\ \text{Tương đương: } &K \cdot \frac{P}{(K-1)P + N_0} \log_2 e \approx \log_2 e = 1.442 \quad \text{bits /s/Hz} \end{aligned} \quad (12)$$

với $K \rightarrow \infty$, hay kịch bản interference-limited tức tạp âm trắng quá nhỏ so với công suất nhiễu từ các nguồn khác, ta sẽ có giới hạn của dung năng đạt được như trên phương trình (12).

2 Kênh đường xuống với tạp âm AWGN

2.1 Mô hình hệ thống và dung năng lý tưởng kênh đường xuống

Ngược lại so với hình 1, ở kênh đường xuống, trạm cơ sở sẽ gửi bản tin độc lập (i.i.d) cho nhiều người dùng cùng lúc. Tín hiệu baseband ở kênh AWGN đường xuống với 2 người dùng cùng lúc là:

$$y_k[m] = h_k x[m] + w_k[m], \quad k = 1, 2 \quad (13)$$

với h_k là độ lợi tương ứng với từng đường truyền, bản tin $x[m]$ có công suất trung bình P J/symbol, và $w[m] \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ là tạp âm Gauss phức có phân bố i.i.d. Khác với kênh đường lên, năng lượng tập trung vào một $x[m]$ duy nhất, và bên thu tự giải điều chế ra bản tin của họ. Do vậy tương tự như bất phương trình (4), vẫn sẽ có giới hạn cho tốc độ truyền ở kênh đường xuống:

$$R_k < \log \left(1 + \frac{P |h_k|^2}{N_0} \right), \quad k = 1, 2 \quad (14)$$

Tốc độ truyền cực đại, hay dung năng lý tưởng có thể đạt được ở trường hợp này xảy ra trong trường hợp người dùng thứ 1 thu tín hiệu với toàn bộ tài nguyên (thời gian + tần số) mà không chia cho người dùng thứ 2 và ngược lại. Điều này là không xảy ra trong thực tế, và cần một phương pháp phân chia tài nguyên hiệu quả hơn.

2.2 Trường hợp đối xứng

Xem xét kỹ hơn, ta có thể chia nhỏ bản tin $x[m]$ mà bên phát gửi cho 2 người dùng tương ứng P_1 và P_2 :

$$x[m] = x_1[m] + x_2[m] \quad (15)$$

Xét trường hợp trạng thái kênh truyền của 2 người dùng là giống nhau hay $h_1 = h_2$, tức là nếu người dùng 1 giải mã được x_1 thì người dùng 2 cũng giải mã được x_1 và ngược lại. Ta sẽ có giới hạn tốc độ truyền lý tưởng vẫn sẽ tương ứng như phương trình (14):

$$R_1 + R_2 < \log \left(1 + \frac{P |h_1|^2}{N_0} \right) \quad (16)$$

Với giả sử trên, ta có trade-off việc phân chia tài nguyên cho 2 người dùng như sau: vẫn áp dụng ý tưởng như SIC, do người dùng 2 có thể giải mã được gói tin của người dùng thứ nhất:

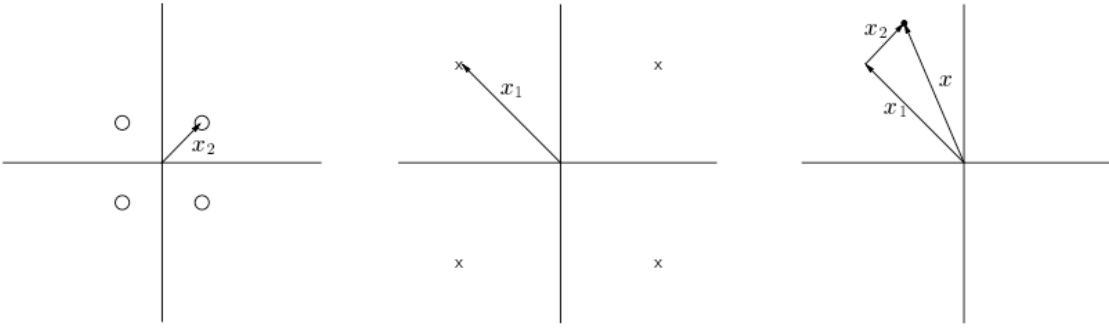
1. Người dùng 1 coi bản tin từ người dùng 2 là tạp âm và giải mã bản tin của họ (x_1) từ y_1 .

$$R_1 = \log \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{P_2 |h_1|^2 + N_0} \right) \quad (17)$$

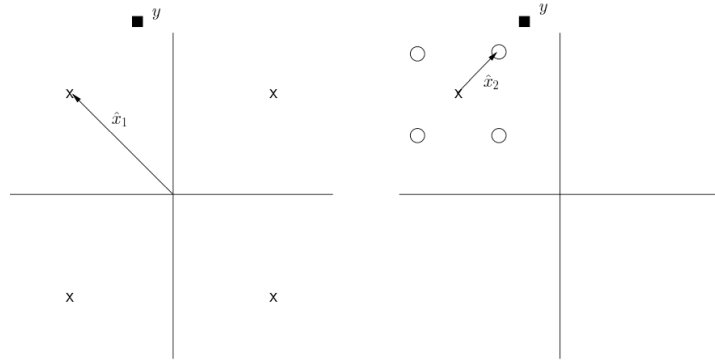
2. Người dùng 2 coi bản tin của chính nó là tạp âm và giải mã bản tin của người dùng 1 (x_1) từ y_2 .
3. Người dùng 2 lấy tín hiệu thu được $y_2 - h_1 x_1$ còn lại $h_2 x_2 + w$ và giải mã bản tin từ phần còn lại thu được x_2 .

$$R_2 = \log \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{N_0} \right) \quad (18)$$

Một ví dụ của phương pháp này là cơ chế mã hóa xếp chồng tín hiệu x_1 và x_2 như trên hình 4a, sau đó sử dụng phương pháp phía trên để giải mã như trên hình 4b. Chi tiết hơn sẽ được trình bày ở mục 2.3.



(a) Mã hóa xếp chồng QPSK: bản tin x_2 chồng lên bản tin x_1



(b) Giải mã xếp chồng QPSK: giải mã bản tin x_1 trước sau đó giải mã x_2

Figure 4: Cơ chế mã xếp chồng

2.3 Trường hợp tổng quát: Cơ chế xếp chồng và phân chia trực giao

Trong trường hợp tổng quát, giả sử $|h_1| < |h_2|$, tức người dùng 2 có điều kiện kênh truyền tốt hơn người dùng 1, lúc này người dùng 2 có thể giải mã bản tin x_1 . Như trên hình 4, sau khi truyền đi tín hiệu đã mã xếp chồng, người dùng 1 giải mã và coi x_2 như tạp âm. Người dùng 2, giải mã x_1 sau đó xử lý các bước như SIC, cuối cùng giải mã thu được x_2 . Tốc độ truyền cùng lúc với $P = P_1 + P_2$ có thể đạt được như trên phương trình (17) và (18).

Cơ chế tối ưu thứ hai đó là phân chia tài nguyên trực giao, khá giống với OFDM được trình bày ở

mục 1.3.2, hệ số α được thêm vào để có:

$$\begin{aligned} R_1 &= \alpha \log \left(1 + \frac{P_1 |h_1|^2}{\alpha N_0} \right) \quad \text{bits/s/Hz}, \\ R_2 &= (1 - \alpha) \log \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{(1 - \alpha) N_0} \right) \quad \text{bits/s/Hz}. \end{aligned} \quad (19)$$

Để nhận xét hai cơ chế này, trên hình 5 là mô phỏng trong trường hợp độ lợi 2 kênh truyền là rất khác biệt. Có thể thấy, ngoài 2 điểm biên, cơ chế xếp chồng luôn cho hiệu quả tốt hơn phân chia tài nguyên trực giao. Với một số điều kiện nhất định, phương pháp giải mã kiểu SIC cho kênh AWGN đường xuống là phương pháp đạt dung năng vùng cho bởi phương trình (17) và (18).

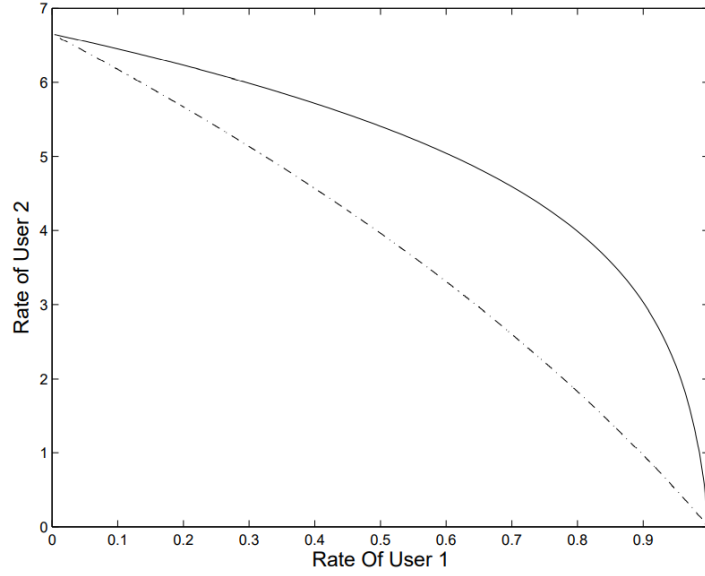


Figure 5: Dung năng khi sử dụng cơ chế xếp chồng (nét liền) và chia tài nguyên trực giao (nét đứt) với $P|h_1|^2/N_0 = 0$ dB và $P|h_2|^2/N_0 = 100$ dB. Đường nét đứt đã được tối ưu hóa cùng lúc P_1, P_2 và α .

Xét trường hợp đối xứng $|h_1| = |h_2| = |h|$, dung năng vùng kênh AWGN đường xuống K người dùng có ràng buộc:

$$\sum_{k=1}^K R_k < \log \left(1 + \frac{P|h|^2}{N_0} \right) \quad (20)$$

Xét trường hợp $|h_1| \leq |h_2| \leq \dots \leq |h_K|$, giới hạn trên cho tốc độ truyền kênh đường xuống của người dùng thứ k đạt được như phương trình phía dưới với $P = \sum_{k=1}^K P_k$. Giới hạn này đạt được khi sử dụng cơ chế mã xếp chồng như đã trình bày ở trên.

$$R_k = \log \left(1 + \frac{P_k |h_k|^2}{N_0 + \left(\sum_{j=k+1}^K P_j \right) |h_k|^2} \right), \quad k = 1 \dots K \quad (21)$$

References

- [1] David Tse and Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communication*. USA: Cambridge University Press, 2005.