



(12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ

(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11)



1-0045208

(51)⁷ H04B 17/00

(13) B

(21) 1-2019-03508

(22) 01/07/2019

(30) 62/691,675 29/06/2018 US

(45) 25/04/2025 445

(43) 30/01/2020 382A

(71) Viavi Solutions, Inc. (US)

1445 South Spectrum Blvd, Suite 102, Chandler, Arizona 85286, United States of America

(72) VERGEL, Julio (US); MOORE, Daniel (US); BALU, Raja (US).

(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) THIẾT BỊ THỬ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP BÙ SỰ MẤT CÂN BẰNG ĐỒNG PHA VÀ CẦU PHƯƠNG (IN-PHASE AND QUADRATURE-IQ)

(21) 1-2019-03508

(57) Sáng chế đề cập đến thiết bị thử nghiệm có thể bao gồm bộ truyền được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu đến bộ phận được thử nghiệm, bộ nhận được tạo cấu hình để nhận các tín hiệu từ bộ phận được thử nghiệm, và bộ điều khiển được tạo cấu hình để tạo bộ lọc bù bộ truyền bằng cách (i) truyền, với bộ truyền, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ nhất để bù sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (IQ) ở các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ nhất, bề mặt đa thức của bộ truyền, và để bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, ít nhất một trong số các tín hiệu cần được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền. Sáng chế cũng đề cập đến phương pháp bù sự mất cân bằng IQ.

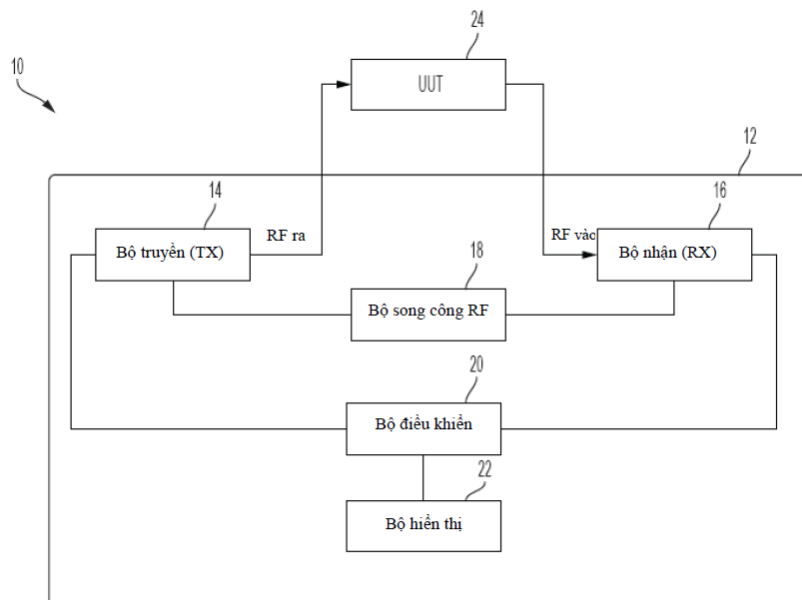


FIG. 1

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Sáng chế đề cập đến các dụng cụ và thiết bị thử nghiệm, và cụ thể hơn là đến các hệ thống, các phương pháp, và các thiết bị sử dụng các bộ truyền và các bộ nhận biến đổi trực tiếp.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Sự mất cân bằng IQ là một trong số những sự giảm sút chính được đưa ra các thành phần tương tự (bộ trộn và các bộ lọc) trong các bộ nhận và các bộ truyền biến đổi trực tiếp (hoặc không qua tần số trung gian (zero-intermediate frequency - IF)). Sự giảm sút này gây ra giảm hiệu năng của cả các hệ thống truyền thông lẫn thiết bị thử nghiệm. Sự mất cân bằng IQ chủ yếu được đưa vào bởi các sự không hoàn thiện của bộ trộn và các sự chênh lệch tần số giữa các kênh đồng pha (in-phase - I) và cầu phương (quadrature - Q). Sự giảm sút này gây ra giảm hiệu năng của cả các hệ thống truyền thông lẫn thiết bị thử nghiệm.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Theo một khía cạnh của sáng chế, thiết bị thử nghiệm có thể bao gồm bộ truyền được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu đến bộ phận được thử nghiệm, bộ nhận được tạo cấu hình để nhận các tín hiệu từ bộ phận được thử nghiệm, và bộ điều khiển. Bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để tạo bộ lọc bù bộ truyền ít nhất bằng cách (i) truyền, với bộ truyền, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ nhất để bù sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (IQ) ở các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ nhất, bề mặt đa thức của bộ truyền. Bộ điều khiển còn có thể được tạo cấu hình để bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, ít nhất một trong số các tín hiệu cần được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền.

Theo một số phương án, bộ điều khiển còn có thể được tạo cấu hình để tạo bộ lọc bù bộ nhận ít nhất bằng cách (i) nhận, với bộ nhận, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ hai để bù sự mất cân bằng IQ ở các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ hai, bề mặt đa thức của bộ nhận. Bộ điều khiển còn có thể được tạo cấu hình để bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ nhận, ít nhất một trong số các tín hiệu sẽ được nhận bởi bộ nhận để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu nhận được, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ nhận để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu nhận được.

Theo một số phương án, việc tạo bộ lọc bù truyền có thể còn bao gồm việc truyền tín hiệu mất cân bằng biên độ đáp lại các pha của bộ truyền và bộ nhận không được đồng bộ hóa.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để tạo bộ lọc bù bộ truyền và bộ lọc bù bộ nhận đồng thời bằng cách dịch các tần số hoạt động tương ứng của bộ trộn của bộ truyền và bộ trộn của bộ nhận trong suốt quá trình truyền và nhận các tín hiệu nhiều sóng sin phức.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để dịch các tần số hoạt động tương ứng bởi bội số của kích thước mẫu phổ (bin size) của khối biến đổi Fourier nhanh (fast Fourier transform - FFT), sao cho mỗi trong số các hình sin phức và các ảnh của sự mất cân bằng IQ nằm trên mẫu phổ của khối FFT.

Theo một số phương án, các tần số theo dõi được thứ nhất có thể bao gồm (i) sự theo dõi thứ nhất ở tần số định trước dương khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước dương và liên hợp phức của tần số định trước dương và (ii) sự theo dõi thứ hai ở tần số định trước âm khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước âm và liên hợp phức của tần số định trước âm.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức bằng cách truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức riêng rẽ vào các thời điểm khác nhau.

Theo một số phương án, bề mặt đa thức của bộ truyền có thể bao gồm ít nhất một tần số nằm ngoài khoảng tần số dải gốc định trước.

Theo một số phương án, sự mất cân bằng IQ có thể bao gồm các ảnh mất cân bằng IQ, và bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để làm giảm các ảnh mất cân bằng IQ đến ít nhất là 60 đêxiben (dB) nhỏ hơn các tín hiệu cần được truyền bởi bộ truyền.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để xác định bề mặt đa thức của bộ truyền bằng cách tính gần đúng hàm đa thức nhiều biến nhờ sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể bao gồm bộ bù sự mất cân bằng IQ bộ truyền, bộ bù sự mất cân bằng IQ bộ nhận, bộ phận hiệu chỉnh biên độ bộ truyền, bộ phận hiệu chỉnh biên độ bộ nhận, bộ phận lấy mẫu lại bộ truyền, bộ phận lấy mẫu lại bộ nhận, bộ phận thu thập, bộ phận phân xử, và ma trận định tuyến trigơ, trong đó bộ phận thu thập và bộ phận phân xử đều truyền thông với ma trận định tuyến trigơ.

Theo một khía cạnh khác của sáng chế, phương pháp có thể bao gồm bước tạo bộ lọc bù bộ truyền. Bước tạo bộ lọc bù bộ truyền có thể bao gồm các bước (i) truyền, với bộ truyền, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ nhất để bù sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (IQ) ở các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ nhất, bề mặt đa thức của bộ truyền.

Theo một số phương án, phương pháp này có thể còn bao gồm bước bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, tín hiệu được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền.

Theo một số phương án, phương pháp này có thể còn bao gồm bước tạo bộ lọc bù bộ nhận. Bước tạo bộ lọc bù bộ nhận có thể bao gồm các bước (i) nhận, với bộ nhận, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ hai để bù sự

mất cân bằng IQ ở các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ hai, bề mặt đa thức của bộ nhận.

Theo một số phương án, phương pháp này có thể còn bao gồm bước bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ nhận, tín hiệu được nhận bởi bộ nhận để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu nhận được, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ nhận để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu nhận được.

Theo một số phương án, bộ lọc bù bộ truyền và bộ lọc bù bộ nhận có thể được tạo ra đồng thời bằng cách dịch các tần số hoạt động tương ứng của bộ trộn của bộ truyền và bộ trộn của bộ nhận trong suốt quá trình truyền và nhận các tín hiệu nhiều sóng sin phức.

Theo một số phương án, các tần số theo dõi được thứ nhất có thể bao gồm (i) sự theo dõi thứ nhất ở tần số định trước dương khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước dương và liên hợp phức của tần số định trước dương và (ii) sự theo dõi thứ hai ở tần số định trước âm khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước âm và liên hợp phức của tần số định trước âm.

Theo một phương án khác nữa của sáng chế, thiết bị thử nghiệm có thể bao gồm bộ truyền được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu đến bộ phận được thử nghiệm, bộ nhận được tạo cấu hình để nhận các tín hiệu từ bộ phận được thử nghiệm, và bộ điều khiển được tạo cấu hình để làm giảm sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (IQ) của các tín hiệu cần được truyền và được nhận. Bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để làm giảm sự mất cân bằng IQ ít nhất bằng cách (i) truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) nhận các tín hiệu nhiều sóng sin được truyền qua các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, các tần số theo dõi thứ hai được dịch từ các tần số theo dõi được thứ nhất, (iii) ước lượng các tập hợp đáp tuyến tần số tương ứng đối với các tín hiệu được truyền và được nhận mà bù sự mất cân bằng IQ ở các tần số theo dõi được thứ nhất và thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (iv) xác định, nhờ sử dụng các tập hợp đáp tuyến tần số, các bề mặt đa thức, (v) tính gần đúng mỗi trong số các bề mặt đa thức với một trong số các đa thức nhiều biến

của bộ truyền và bộ nhận tương ứng, và (vi) làm giảm sự mất cân bằng IQ của các tín hiệu cần được truyền và được nhận dựa trên các đáp tuyến tần số được tính nhờ sử dụng các đa thức nhiều biến của bộ truyền và bộ nhận.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để làm giảm sự mất cân bằng IQ sao cho các ảnh mất cân bằng IQ ít nhất là bằng 60 deciben (dB) nhỏ hơn ít nhất một trong số các tín hiệu được truyền và được nhận.

Theo một số phương án, bộ điều khiển có thể được tạo cấu hình để làm giảm sự mất cân bằng IQ đối với các tần số bao trùm độ rộng dải tần 6-GHz.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Phần mô tả chi tiết đề cập cụ thể đến các hình vẽ sau đây, trong đó:

Fig.1 là sơ đồ khối đơn giản hóa của hệ thống thử nghiệm bao gồm hệ thống thiết bị thử nghiệm và bộ phận được thử nghiệm (UUT);

Fig.2 là sơ đồ khối giản lược của mạch bộ truyền của thiết bị thử nghiệm trên Fig.1;

Fig.3 là sơ đồ khối giản lược của mạch bộ nhận của thiết bị thử nghiệm trên Fig.1;

Fig.4 là sơ đồ khối đơn giản hóa của bộ điều khiển của thiết bị thử nghiệm trên Fig.1;

Fig.5 là sơ đồ khối giản lược của cấu trúc logic của bộ điều khiển của thiết bị thử nghiệm trên Fig.1;

Fig.6 là bảng minh họa các thông số làm ví dụ có thể được sử dụng để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ;

Fig.7 là đồ thị minh họa tín hiệu nhiễu sóng sin được truyền ở tần số 5,125 GHz mà không bù trước bộ truyền được nhận bởi bộ nhận trên Fig.1;

Fig.8A là đồ thị minh họa bề mặt lọc bù của bộ truyền trên Fig.1;

Fig.8B là đồ thị minh họa bề mặt đa thức phù hợp với tần số RF bất kỳ dựa trên bộ lọc bù được ước lượng trên Fig.8A;

Fig.8C là đồ thị minh họa bề mặt đa thức cực bộ bao trùm vừa vận tần số RF để bù tần số được tạo ra nhờ sử dụng các thông số trên Fig.6 để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ;

Fig.9A là đồ thị minh họa bề mặt lọc bù của bộ nhận trên Fig.1;

Fig.9B là đồ thị minh họa bề mặt đa thức phù hợp với tần số RF bất kỳ dựa trên bộ lọc bù được ước lượng trên Fig.9A;

Fig.9C là đồ thị minh họa bề mặt đa thức cực bộ bao trùm vừa vận tần số RF mục tiêu được tạo ra nhờ sử dụng các thông số trên Fig.6 để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ;

Fig.10A là đồ thị minh họa phổ của các ảnh của sự mất cân bằng TX ở tần số 5,125 GHz; và

Fig.10B và Fig.10C là các đồ thị minh họa đầu ra sau khi bù trước trong bộ truyền và bù sau trong bộ nhận trên Fig.1.

Mô tả chi tiết sáng chế

Mặc dù sáng chế dễ dàng có các dạng biến đổi khác nhau và thay thế khác nhau, nhưng các phương án làm ví dụ cụ thể của sáng chế đã được thể hiện theo cách ví dụ trên các hình vẽ và sẽ được mô tả chi tiết ở đây. Tuy nhiên, cần hiểu rằng các khái niệm của sáng chế không được dự định sẽ bị giới hạn ở các dạng cụ thể được bộc lộ, mà ngược lại, sáng chế nhằm bao trùm tất cả các dạng biến đổi, tương đương, và thay thế nằm trong mục đích và phạm vi của sáng chế như được xác định bởi yêu cầu bảo hộ kèm theo.

Dựa vào Fig.1, hệ thống thiết bị thử nghiệm 10 được tạo cấu hình để đánh giá bộ phận được thử nghiệm (UUT) 24 được thể hiện. Trong phương án minh họa, thiết bị thử nghiệm 10 bao gồm bộ truyền tạo tín hiệu thử nghiệm biến đổi trực tiếp 14 được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu thử nghiệm đến UUT 24 và bộ nhận biến đổi trực tiếp 16 được tạo cấu hình để nhận các tín hiệu từ UUT 24. Như được thảo luận trên đây, sự mất cân bằng IQ có thể được đưa vào bởi các sự không hoàn thiện của bộ trộn và các sự chênh lệch tần số giữa các kênh đồng pha (in-phase - I) và cầu phương (quadrature - Q). Sự giảm sút này gây ra giảm hiệu năng của các hệ thống truyền thông

và giảm độ chính xác của thiết bị thử nghiệm 12. Như vậy, thiết bị thử nghiệm 12 được tạo cấu hình để bù các sự giảm sút do sự mất cân bằng IQ tại bộ truyền 14 và bộ nhận 16 để cải thiện hoạt động của thiết bị thử nghiệm 12.

Như được thảo luận chi tiết dưới đây, thiết bị thử nghiệm 12 được tạo cấu hình để ước lượng các bộ lọc bù để loại bỏ các sự mất cân bằng IQ đối với bộ truyền 14 và bộ nhận 16 ở tần số RF đã cho dựa trên các sự theo dõi sử dụng thuật toán bù. Cụ thể, bộ lọc bù trên bộ truyền 14 được sử dụng để bù trước tín hiệu được truyền đến UUT 24 để làm giảm sự mất cân bằng IQ được đưa vào bởi chuỗi tương tự truyền (cũng được gọi là TX), trong khi đó, bộ lọc bù trên bộ nhận 16 được sử dụng để bù sau tín hiệu nhận được từ UUT 24 để làm giảm sự mất cân bằng IQ được đưa vào bởi chuỗi tương tự nhận (cũng được gọi là RX). Cần hiểu rằng các bộ lọc bù được ước lượng ở các tần số RF được theo dõi có thể được lưu trữ để căn chỉnh. Nói cách khác, thiết bị thử nghiệm 12 được tạo cấu hình để xác định bộ lọc bù đối với tập hợp các tần số RF mà có thể được sử dụng để xác minh liệu các ảnh mất cân bằng IQ có nhỏ hơn mức ngưỡng định trước hay không. Ví dụ, các ảnh mất cân bằng IQ nhỏ hơn 60 dB nhỏ hơn tín hiệu được truyền/được nhận được mong muốn. Trong phương án minh họa, thiết bị thử nghiệm 12 được tạo cấu hình để bù tần số RF bất kỳ lên đến 6 GHz bằng cách biến đổi các tần số theo dõi thành bề mặt mà có thể được tính gần đúng, nhờ sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất, đến hàm đa thức nhiều biến, như được mô tả chi tiết hơn dưới đây. Cần hiểu rằng quy trình bù sự mất cân bằng IQ có thể được thực thi trên nền tảng thích hợp bất kỳ.

Như được thể hiện trên Fig.1, thiết bị thử nghiệm 12 bao gồm bộ truyền hoặc bộ tạo 14, bộ nhận 16, bộ song công tần số radio (RF) 18, bộ điều khiển 20, và bộ hiển thị 22. Bộ truyền 14 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số mạch và/hoặc các thành phần có khả năng truyền thông với UUT 24 để truyền các tín hiệu đến UUT 24. Bộ nhận 16 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số mạch và/hoặc các thành phần có khả năng truyền thông các tín hiệu từ UUT 24 để nhận các tín hiệu từ UUT 24. Trong phương án minh họa, bộ truyền 14 và bộ nhận 16 truyền thông qua các cổng hoặc các bộ nối riêng rẽ với UUT 24. Tuy nhiên, theo một số phương án, bộ truyền 14 và bộ nhận 16 có thể truyền thông với UUT 24 qua cổng hoặc bộ nối song công tần số radio (RF) 18. Bộ nối song công RF 18 có thể được thực hiện dưới dạng

loại bất kỳ trong số mạch và/hoặc các thành phần có khả năng thực hiện truyền thông hai hướng giữa bộ truyền 14/bộ nhận 16 và UUT 24 bằng cách chia sẻ bộ nối chung.

Bộ điều khiển 20 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số thiết bị hoặc nhóm thiết bị có khả năng thực hiện các chức năng tính toán khác nhau được mô tả ở đây. Trong phương án minh họa, bộ điều khiển 20 được tạo cấu hình để ước lượng các bộ lọc bù ở tần số RF đã cho đối với bộ truyền 14 và bộ nhận 16 dựa trên các sự theo dõi. Ngoài ra, bộ điều khiển 20 có thể nạp các bộ lọc bù được ước lượng để xác minh rằng các ảnh mất cân bằng IQ nhỏ hơn ngưỡng định trước.

Bộ hiển thị 22 của thiết bị thử nghiệm 12 có thể được thực hiện dưới dạng loại bộ hiển thị bất kỳ có khả năng hiển thị thông tin số như màn hình tinh thể lỏng (liquid crystal display - LCD), điốt phát quang (light emitting diode - LED), màn hình plasma, ống tia catôt (cathode ray tube - CRT), hoặc loại thiết bị hiển thị khác. Theo một số phương án, bộ hiển thị 22 có thể được ghép nối với màn hình chạm để cho phép sự tương tác của người dùng với thiết bị thử nghiệm 12. Thiết bị thử nghiệm 12 cũng có thể bao gồm số lượng bất kỳ các thiết bị vào/ra, thiết bị giao tiếp, và/hoặc các thiết bị ngoại vi khác bổ sung. Ví dụ, theo một số phương án, các thiết bị ngoại vi có thể bao gồm màn hình chạm, mạch đồ họa, bàn phím, chuột, hệ thống loa, giao diện mạng, và/hoặc các thiết bị vào ra, các thiết bị giao tiếp, và/hoặc các thiết bị ngoại vi khác.

Dựa vào Fig.2, mạch 26 làm ví dụ minh họa cấu trúc của bộ truyền 14 được ghép nối truyền thông với bộ song công RF 18 được thể hiện. Bộ truyền 14 bao gồm một hoặc nhiều bộ biến đổi số-tương tự (digital-to-analog - DA) 27 được tạo cấu hình để biến đổi các mẫu tín hiệu RF đến thành ở dạng số thành tín hiệu RF tương tự. Tín hiệu RF tương tự có thể được điều biến trước khi được truyền đến UUT 24. Dựa vào Fig.3, mạch 28 làm ví dụ minh họa cấu trúc của bộ nhận 16 được ghép nối truyền thông với bộ song công RF 18 được thể hiện. Bộ nhận 16 bao gồm một hoặc nhiều bộ biến đổi tương tự-số (analog-to-digital - AD) 29 được tạo cấu hình để biến đổi tín hiệu đầu ra RF tương tự thành tín hiệu RF được số hóa. Tín hiệu RF được số hóa có thể được giải điều biến trước khi được kết xuất đến bộ điều khiển 20. Cần hiểu rằng, theo một số phương án, bộ truyền 14 và bộ nhận 16 có thể được kết hợp thành bộ truyền-nhận để cả truyền lẫn nhận các tín hiệu.

Bộ điều khiển 20 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số thiết bị tính toán hoặc máy tính có khả năng thực hiện các chức năng được mô tả ở đây, bao gồm, mà không phải giới hạn, máy tính, máy chủ, máy trạm, máy tính xách tay laptop, máy tính xách tay notebook, máy tính bảng, thiết bị tính toán di động, thiết bị tính toán đeo được, thiết bị mạng, thiết bị tính toán phân tán, hệ thống dựa trên bộ xử lý, và/hoặc thiết bị điện tử người tiêu dùng. Như được thể hiện trên Fig.4, bộ điều khiển 20 bao gồm theo cách minh họa bộ xử lý 30, bộ nhớ 32, hệ thống con vào/ra (I/O) 34, hệ thống con truyền thông 36, mảng cổng lập trình được dạng trường (field-programmable gate array - FPGA) 38, một hoặc nhiều bộ lưu trữ dữ liệu 40, và một hoặc nhiều thiết bị ngoại vi 42. Cần hiểu rằng bộ điều khiển 20 có thể bao gồm các thành phần khác hoặc bổ sung, như các thành phần thường thấy trong máy tính (ví dụ, các thiết bị vào ra khác nhau), trong các phương án khác. Ngoài ra, theo một số phương án, một hoặc nhiều thành phần được minh họa có thể được kết hợp vào, hoặc nếu không thì tạo thành một phần của, một thành phần khác. Ví dụ, bộ nhớ 32, hoặc các phần của nó, có thể được kết hợp vào bộ xử lý 30 theo một số phương án.

Bộ xử lý 30 có thể được thực hiện dưới dạng loại bộ xử lý bất kỳ có khả năng thực hiện các chức năng được mô tả ở đây. Ví dụ, bộ xử lý 30 có thể được thực hiện dưới dạng (các) bộ xử lý một hoặc nhiều nhân, bộ xử lý tín hiệu số, bộ vi điều khiển, hoặc bộ xử lý hoặc mạch xử lý/điều khiển khác. Tương tự, bộ nhớ 32 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số bộ nhớ khả biến hoặc bất khả biến hoặc bộ lưu trữ dữ liệu có khả năng thực hiện các chức năng được mô tả ở đây. Khi hoạt động, bộ nhớ 32 có thể lưu trữ dữ liệu và phần mềm khác nhau được sử dụng trong suốt quá trình hoạt động của thiết bị thử nghiệm 12 như các hệ điều hành, các ứng dụng, các chương trình, các thư viện, và các trình điều khiển. Bộ nhớ 32 được ghép nối truyền thông với bộ xử lý 30 qua hệ thống con I/O 34, mà có thể được thực hiện dưới dạng mạch và/hoặc các thành phần để hỗ trợ các hoạt động vào/ra với bộ xử lý 30, bộ nhớ 32, và các thành phần khác của bộ điều khiển 20. Ví dụ, hệ thống con I/O 34 có thể được thực hiện dưới dạng, hoặc nếu không thì bao gồm, các điểm kết nối trung tâm (hub) điều khiển bộ nhớ, các điểm kết nối trung tâm (hub) điều khiển vào/ra, các thiết bị phân sụn, các liên kết truyền thông (tức là, các liên kết điểm-điểm, các liên kết bus, các dây, các cáp, các bộ dẫn sáng, các đường băng mạch in, v.v.) và/hoặc các thành

phần và các hệ thống con khác để hỗ trợ các hoạt động vào/ra. Theo một số phương án, hệ thống con I/O 34 có thể tạo thành một phần của hệ thống trên chip (system-on-a-chip - SoC) và được kết hợp, cùng với bộ xử lý 30, bộ nhớ 32, và các thành phần khác của bộ điều khiển 20 (ví dụ, các thiết bị ngoại vi 42), trên một mạch tích hợp đơn lẻ.

Hệ thống con truyền thông 36 có thể được thực hiện dưới dạng loại bất kỳ trong số mạch, thiết bị truyền thông hoặc sự kết hợp của chúng, có khả năng cho phép truyền thông giữa bộ điều khiển 20 và UUT 24. Để thực hiện điều này, hệ thống con truyền thông 36 có thể được tạo cấu hình để sử dụng một hoặc nhiều kỹ thuật truyền thông bất kỳ (ví dụ, truyền thông vô tuyến hoặc hữu tuyến) và các giao thức kết hợp (ví dụ, Ethernet, Bluetooth®, Wi-Fi®, WiMAX, LTE, 5G, v.v.) để tác động lên việc truyền thông đó. FPGA 38 có thể được thực hiện dưới dạng loại mạch bất kỳ bao gồm mảng của các khối lập trình được mà có thể tạo cấu hình được để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ. Bộ lưu trữ dữ liệu 40 có thể được thực hiện dưới dạng loại thiết bị hoặc các thiết bị bất kỳ được tạo cấu hình để lưu trữ dữ liệu ngắn hạn hoặc dài hạn như, ví dụ, các thiết bị và các mạch nhớ, các thẻ nhớ, các ổ đĩa cứng, các ổ đĩa trạng thái rắn, hoặc các thiết bị lưu trữ dữ liệu khác. Trong phương án minh họa, bộ lưu trữ dữ liệu 40 có thể lưu trữ các bộ lọc phức được ước lượng đối với bộ truyền 14 và bộ nhận 16 ở các tần số RF được theo dõi để căn chỉnh.

Dựa vào Fig.5, mạch 50 làm ví dụ minh họa cấu trúc của bộ điều khiển 20 có FPGA 38, bao gồm nhiều kênh định tuyến. Ví dụ, theo phương án minh họa, FPGA 38 bao gồm hai kênh định tuyến 52 (tức là, các kênh ADC) được ghép nối truyền thông với bộ nhận 16 và hai kênh định tuyến 54 (tức là, các kênh DAC) được ghép nối truyền thông với bộ truyền 14. Các kênh ADC đến 52 được nối với bộ bù mất cân bằng IQ 60, bộ hiệu chỉnh biên độ 62, bộ phận lấy mẫu lại 64, và bộ phận thu thập (ACQ) 66. Tương tự, các kênh DAC đi 54 được nối với bộ bù mất cân bằng IQ 68, bộ hiệu chỉnh biên độ 70, bộ phận lấy mẫu lại 72, và bộ phận phân xử (ARB) 74. Bộ phận ACQ 66 và bộ phận ARB 74 được tạo cấu hình để truyền thông với ma trận định tuyến trigơ 76. Cần hiểu rằng, theo một số phương án, mỗi bộ trong số các bộ bù mất cân bằng IQ 60, 68 có thể được thực hiện dưới dạng một phần của bộ truyền 14 và bộ nhận 16.

A. Ước lượng và bù IQ

Như được mô tả trên đây, sự mất cân bằng IQ chủ yếu được đưa vào bởi các sự không hoàn thiện của bộ trộn và các sự chênh lệch tần số giữa các kênh đồng pha (in-phase - I) và cầu phương (quadrature - Q). Sự giảm sút này gây ra giảm hiệu năng của cả các hệ thống truyền thông lẫn thiết bị thử nghiệm. Các bước chính của phương pháp ước lượng các bộ lọc phức đối với bộ truyền (TX) 14 và bộ nhận (RX) 16 được tổng kết dưới đây. Các định nghĩa sau đây là hữu ích để mô tả phương pháp này:

- O_1 là sự theo dõi ở tần số f khi sóng sin phức ở tần số f được truyền.
- O_2 là sự theo dõi ở tần số $-f$ khi sóng sin phức ở tần số f được truyền.
- O_3 là sự theo dõi ở tần số $-f$ khi sóng sin phức ở tần số $-f$ được truyền.
- O_4 là sự theo dõi ở tần số f khi sóng sin phức ở tần số $-f$ được truyền.
- $O_{n,\Delta}$ là sự theo dõi O_n với sự mất cân bằng biên độ vốn có trên kênh I của $\Delta\eta$.

1) *Ước lượng bù lọc mất cân bằng bộ truyền (TX)*: Sự mất cân bằng TX có thể được trích xuất từ một sự theo dõi nếu pha được đồng bộ hóa. Do sự đồng bộ hóa này khó đạt được trong phần cứng, nên tín hiệu thứ hai với sự mất cân bằng biên độ cũng có thể được truyền. Một phương pháp trích xuất sự mất cân bằng TX được mô tả trong De Witt, J. J. (2011), *Modelling, estimation and compensation of imbalances in quadrature transceivers* (luận văn). Tóm lại, bộ lọc bù TX ở tần số f_m được cho bởi:

$$Q(f_m) = \frac{\eta_M(f_m)e^{j\psi_M(f_m)} - 1}{\eta_M(f_m)e^{j\psi_M(f_m)} + 1}, \quad (1)$$

trong đó

$$\eta_M(f_m) = \left| \frac{\sqrt{\Delta\eta xy}}{\Delta\eta y} \right|$$

và

$$\psi_M(f_m) = \pm \arccos \left| \frac{(\Delta\eta - 1)(\Delta\eta + 1)(K_2 - 1)(K_1 - 1)}{2\sqrt{\Delta\eta xy}} \right|,$$

trong đó

$$\begin{aligned}
x &= 1 + K_1 - K_2 - K_2 K_1 + \Delta\eta K_1 - \Delta\eta + \Delta\eta K_2 K_1 - \Delta\eta K_2, \\
y &= -\Delta\eta - \Delta\eta K_1 + \Delta\eta K_2 + \Delta\eta K_2 K_1 + 1 - K_1 + K_2 - K_2 K_1, \\
K_1 &= \frac{O_4}{O_1},
\end{aligned}$$

và

$$K_2 = \frac{O_{4,\Delta}}{O_{1,\Delta}}.$$

Cần lưu ý trong phương trình (1) rằng dấu của góc ψ_M không thể được giải. Kết quả là, có thể cần phải thử nghiệm hai khả năng và chọn giá trị mà tạo ra sự loại trừ ảnh mất cân bằng IQ tốt nhất, ví dụ, cao nhất.

2) *Ước lượng bù lọc mất cân bằng bộ nhận (RX)*: Một phương pháp tính toán sự bù lọc mất cân bằng RX được mô tả trong De Witt (2011). Sự bù lọc mất cân bằng IQ đối với sự mất cân bằng bộ nhận (RX) có thể được tính toán dưới dạng:

$$P(-f_r) = \frac{O_{i,f_r}}{O_{d,f_r}^*}, \quad (2)$$

trong đó O_{i,f_r} là sự theo dõi O_i ở tần số f_r .

B. Điều chỉnh phương pháp bề mặt của bình phương nhỏ nhất

Như được mô tả chi tiết hơn dưới đây, các sự theo dõi phức nêu trên có thể được điều chỉnh phù hợp với hàm đa thức sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất hoặc tối thiểu.

1) *Hình thành vấn đề*: Cho $N \times M$ điểm ở các vị trí (x_i, y_j) trong $\mathbb{R}^2$ trong đó $i \in [1 \dots N], j \in [1 \dots M]$. Để thu được hàm đa thức $p(x,y)$ có bậc m_x trong x và m_y trong y mà tính gần đúng các giá trị vô hướng đã cho $p_{i,j}$ ở các điểm (x_i, y_j) sử dụng phương pháp tính gần đúng bình phương nhỏ nhất theo hàm độ sai $J_{LS} = \sum_{i,j} \|p(x_i, y_i) - p_{i,j}\|^2$, giá trị sai tối thiểu có thể là sao cho:

$$\min_{p \in \mathbb{R}^2} \sum_{i,j} \|p(x_i, y_i) - p_{i,j}\|^2, \quad (3)$$

trong đó p làm hàm trong $\mathbb{R}^2$ với k hệ số và có thể được viết là

$$p(x, y) = b(x, y)^T c = b(x, y) \cdot c, \quad (4)$$

trong đó $b(x,y)$ là vector cơ sở đa thức và $c = [c_1, \dots, c_k]^T$ là vector của các hệ số không biết cần được tối thiểu hóa nhờ sử dụng phương trình (3).

Lúc này, cần lưu ý rằng các vector cơ sở trong phương trình (4) có thể trở thành rất lớn khi m_x và m_y tăng lên, mà có thể làm cho hệ thống không có khả năng giải quyết sau này. Để rút ngắn vector cơ sở, x và y được coi là không tương quan và, do đó, tất cả các thành phần chéo của $p(x,y)$ sẽ bằng không (0). Theo đó, $k = m_x + m_y + 1$. Để thuận tiện, các số hạng x và y được nhóm theo thứ tự giảm với số hạng không đổi ở cuối cùng, sao cho

$$b(x, y) = [x^{m_x}, \dots, x^1, y^{m_y}, \dots, y^1, 1]^T. \quad (5)$$

2) *Giải quyết*: Hệ thống được xây dựng để tối thiểu hóa phương trình (3) bằng cách sử dụng phương pháp của phương trình chuẩn tắc:

$$\begin{bmatrix} b^T(x_1, y_1) \\ \vdots \\ b^T(x_i, y_j) \end{bmatrix} c = \begin{bmatrix} p_{1,1} \\ \vdots \\ p_{i,j} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

mà có thể được giải dễ dàng là

$$c = (B^T B)^{-1} B^T p. \quad (7)$$

Cần hiểu rằng phương trình (6) đòi hỏi sử dụng hàm ngược, và, do đó, có lúc sẽ không có hiệu quả trên thực tế. Giải quyết hệ thống của phương trình (7) bằng cách tính toán phân tích QR qua phương pháp chủ của thư viện Eigen (Eigen library's householder) thu được hiệu năng chấp nhận được.

Trong phương trình (5) trên đây, tất cả các thành phần chéo trong hệ thống được giả định là bằng không (0) khi cố gắng làm giảm độ phức tạp tính toán của hệ thống. Điều này là hữu ích trên thực tế do, trong một số trường hợp, m_x và m_y được thấy là cao bằng 15 để tạo ra sự phù hợp tốt – có nghĩa là vài trăm thành phần chéo có thể cần được xem xét trong các trường hợp này. Tuy nhiên, chất lượng của bề mặt được điều chỉnh phù hợp có thể được nâng cao nhờ đưa vào số lượng tổng các thành phần chéo định trước. Việc chọn để cho phép các thành phần chéo có bậc m_{xy} và nhỏ hơn đưa vào

$$k_{xy} = \frac{m_{xy}(m_{xy} - 1)}{2}$$

nhiều số hạng hơn vào phương trình (5), và hệ thống có thể được giải quyết theo cách tương tự.

Chất lượng của bề mặt được điều chỉnh phù hợp cũng có thể được nâng cao nhờ áp dụng chuyển đổi dịch tâm vào các tọa độ đầu vào (x_i, y_j) . Điều này được thực hiện bằng cách định tâm x và y quanh 0 và định tỷ lệ chúng đến độ lệch tiêu chuẩn đơn vị, sao cho

$$\hat{x} = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

và

$$\hat{y} = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y},$$

mà là quy trình để nâng cao các tính chất số học của hệ thống.

Để ước lượng sự mất cân bằng IQ nhờ sử dụng phương pháp ước lượng được mô tả trên đây, tổng phức hợp phải được truyền và nhận trong cùng một thiết bị. Ngoài ra, để ước lượng cả sự mất cân bằng TX lẫn RX đồng thời, độ dịch giữa bộ trộn TX và RX được đòi hỏi. Do điều được mong muốn là ước lượng đồng thời một số sai số mất cân bằng IQ để làm giảm thời gian căn chỉnh, một số sóng sin phức sẽ được truyền đồng thời. Do đó, tín hiệu được truyền sẽ là như sau:

$$s[n] = \sum_{m=0}^{m=N} e^{j2\pi mfn},$$

trong đó N là tổng số lần theo dõi mong muốn trên các tần số dương (đối với các tần số âm, sẽ được truyền). Tuy nhiên, nếu quá nhiều sóng sin được truyền, thì có thể thu được tỷ số đỉnh so với trung bình cao. Do tín hiệu được số hóa để ước lượng sự mất cân bằng IQ, nên độ chính xác có thể bị mất đi ở bộ biến đổi AD. Do đó, tất cả các sóng sin được yêu cầu sẽ được chia thành các tín hiệu khác nhau mà được truyền vào các thời điểm khác nhau. Ngoài ra, biến đổi Fourier nhanh (FFT) có thể được sử dụng trong bộ nhận để ước lượng sự mất cân bằng IQ. Để đảm bảo rằng FFT càng nhỏ càng tốt, độ dịch giữa bộ nhận và bộ truyền mà là bội số của kích thước mẫu phổ có thể

được sử dụng, sao cho tín hiệu và các ảnh nằm trên mẫu phổ FFT.

Xét đến các dấu hiệu trên đây, K tín hiệu sau đây được xác định:

$$s_p[n] = \sum_{m=0}^{m=\lfloor \frac{N}{K} \rfloor} e^{j2\pi f_{steps}(p+Km)n}, \quad (8)$$

trong đó N là tổng số lần quan sát, K chỉ báo khoảng cách (Kf_{step} , Hz) giữa các tông đôi với tín hiệu nhiều sóng sin, $p = [0, \dots, K-1]$ chỉ báo độ dịch tần số ban đầu (pf_{step} , Hz) của các sóng sin phức để truyền, $f_{steps} = \frac{Bw}{N}$, và Bw là độ rộng dải tần dải gốc cần được bù.

Tín hiệu $s_p(n)$ sẽ được truyền để ước lượng sự mất cân bằng IQ của các tần số dương và $s_p^*(n)$ để ước lượng sự mất cân bằng IQ của các tín hiệu tần số âm. Cần hiểu rằng các tín hiệu này đáp ứng các yêu cầu là một số sóng sin phức được truyền và độ dịch p là bội số của kích thước mẫu phổ. Hơn nữa, các tần số của tín hiệu được tách bởi khoảng cách mẫu phổ. Do đó, tất cả các tần số đó sẽ nằm trên các mẫu phổ của FFT do không có độ dịch tần số phụ. Điều quan trọng cần phải lưu ý là, do bộ truyền và bộ nhận được nối với cùng một bộ tạo nhịp, nên chúng sẽ đồng bộ hóa hoàn hảo và các sóng sin phức được truyền và các ảnh mất cân bằng IQ của nó nằm chính xác trên mẫu phổ FFT.

Tín hiệu mất cân bằng biên độ thứ hai được đòi hỏi để ước lượng việc bù mất cân bằng bộ truyền nếu sự đồng bộ pha không được đảm bảo. Do đó, tín hiệu mất cân bằng biên độ sau đây được truyền:

$$S_{p,\Delta}[n] = \sum_{m=0}^{m=\lfloor \frac{N}{K} \rfloor} \Delta\eta \cos(2\pi f(p + Km)n) + j \sin(2\pi f(p + Km)n). \quad (9)$$

Có thể thấy đáp tuyến tần số của bộ lọc bù đối với bộ nhận, $\tilde{H}_{rx}$, và bộ truyền, $\tilde{H}_{tx}$, nhờ sử dụng các tín hiệu $s_p[n]$ và $s_{p,\Delta}[n]$ và thuật toán được tổng kết trên đây.

Độ dịch một chiều (direct current - DC) được đưa vào bởi DAC tác động đến sự theo dõi và, vì vậy, cũng tác động đến việc ước lượng của các bộ lọc bù. Theo đó, hai tông phức hợp đặc biệt,

$$s_{tone}[n] \quad (10)$$

phải được gửi ở f_{steps} và $-f_{steps}$. Các tông này được sử dụng để ước lượng đáp tuyến tần số của bộ lọc bù ở các tần số dải gốc f_{steps} và $-f_{steps}$.

Nhờ định nghĩa $s_p^f[n]$ là tín hiệu $s_p[n]$ ở tần số RF f và $\tilde{H}_f[k]$ là bộ lọc được ước lượng bù tần số dải gốc ở tần số RF f , nên có thể định nghĩa ma trận của các sự theo dõi, $\tilde{H}$, là bề mặt, B , sao cho:

$$B = \begin{bmatrix} \tilde{H}_0[0], & \tilde{H}_0[1], & \cdots & \tilde{H}_0[N] \\ \tilde{H}_1[0], & \tilde{H}_1[1], & \cdots & \tilde{H}_1[N] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{H}_M[0], & \tilde{H}_M[1], & \cdots & \tilde{H}_M[N] \end{bmatrix}$$

Các sự theo dõi này tạo ra bề mặt mà có thể tính gần đúng đến phương trình đa thức.

Như được mô tả trên đây, các sự theo dõi phức có thể được điều chỉnh phù hợp nhờ sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất đến hàm đa thức có hai biến, $p(f_{RF}, f_{BB})$, trong đó f_{RF} là tần số RF và f_{BB} là tần số dải gốc. Các việc tính gần đúng hàm đa thức bộ truyền và bộ nhận lần lượt được định nghĩa là $p_{tx}(f_{RF}, f_{BB})$ và $p_{rx}(f_{RF}, f_{BB})$.

Có hai phương pháp tiềm năng để tính gần đúng bề mặt để bù. Phương pháp thứ nhất, hàm đa thức mà điều chỉnh phù hợp toàn bộ bề mặt dựa trên tần số RF và tần số BB. Phương pháp này có ưu điểm là các bảng tần số dùng cho tất cả các sự theo dõi không cần được lưu trữ. Trong trường hợp này, chỉ phương trình hàm đa thức được đòi hỏi. Tuy nhiên, do bề mặt lớn được điều chỉnh phù hợp, nên sự phù hợp kém trên các tần số nhất định có thể được tìm thấy. Phần thứ hai là để điều chỉnh phù hợp bề mặt này quanh tần số RF mà sẽ được bù. Trong trường hợp này, các bảng theo dõi phải được lưu trữ nhưng vẫn mong đợi hiệu năng cao hơn.

Một khi hàm đa thức được ước lượng, bộ lọc bù ở tần số mong muốn, F_{RF} , có thể được tính. Đáp tuyến tần số dải gốc của bộ lọc bù là $p(F_{RF}, f_{BB})$. Hơn nữa, vector của các giá trị ước lượng ở một số tần số dải gốc, $\vec{f}_{BB}$, có thể được tính: $\vec{p}(F_{RF}, \vec{f}_{BB})$. Cần hiểu rằng tần số RF và vector của các tần số dải gốc, $\vec{f}_{BB}$, có thể là một trong số các loại của các tần số theo dõi hoặc không.

Đáp ứng xung lọc phức có thể được ước lượng bằng cách tìm tập hợp các đầu lọc (filter tap) mà tối thiểu hóa sai số (theo quan điểm bình phương nhỏ nhất) giữa các

tín hiệu mong muốn và tạo thành. Phương trình sau đây có thể được sử dụng để tính các đầu lọc:

$$\vec{a} = Q^{-1}\vec{b}$$

trong đó

$$Q_{n,k} = \sum_{m=0}^{M-1} w_m e^{-j2\pi f_m(n+k-2\rho)}$$

và

$$b_k = \sum_{m=0}^{M-1} w_m D_m e^{-j2\pi f_m(k-\rho)}$$

và trong đó $\vec{a}$ là chỉ báo về các đầu được tính toán, w là chỉ báo về trọng số, f là tần số mà tại đó các sự theo dõi được thực hiện, và D là đáp tuyến tần số mong muốn ở tần số (hoặc các tần số) f .

Theo các phương án khác, đáp ứng xung của bộ lọc có thể được ước lượng nhờ sử dụng phương pháp cửa sổ. Trong phương pháp này, đáp ứng xung của đáp tuyến tần số mong muốn thu được nhờ FFT ngược. Độ dài của đáp tuyến tần số, $\vec{f}_{BB}$, sẽ giống như của độ dài bộ lọc mong muốn, L , và cách đều trên dải để bù. Đáp ứng xung được xác định là:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{un} &= \mathcal{IFFT}\{\vec{f}_{BB}\} \\ \tilde{h}[n] &= w[n] \cdot \tilde{h}_{un}[n], 0 \leq n < N \end{aligned}$$

trong đó $\tilde{h}$ là bộ lọc bù được ước lượng và w là cửa sổ mong muốn. Cần hiểu rằng hai bộ lọc khác nhau cần được ước lượng, một bộ lọc cho bộ truyền và một bộ lọc khác cho bộ nhận.

Như được mô tả trên đây, thuật toán để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ bộ truyền (TX) và bộ nhận (RX) bởi hệ thống thử nghiệm bao gồm truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức đối với các tần số RF mong muốn, ước lượng các đáp tuyến tần số trong các tần số RF mong muốn, xác định đa thức phù hợp với vùng xung quanh tần số RF mục tiêu để bù dựa trên các sự ước lượng, tính, nhờ sử dụng sự phù hợp đa thức,

đáp tuyến tần số của bộ lọc bù, và tính các đáp ứng xung phức cho bộ lọc bù trước TX và bộ lọc bù sau RX sử dụng phương pháp cửa sổ.

Thiết bị thử nghiệm 12 tạo ra các ảnh mất cân bằng IQ cao trong cả bộ truyền 14 lẫn bộ nhận 16. Fig.7 thể hiện đồ thị 80 làm ví dụ của tín hiệu nhiều sóng sin phức 82 được truyền ở tần số trung tâm định trước, ví dụ, 5,125 GHz, mà không bù trước TX. Như được minh họa bởi thành phần 84, các sự giảm sút do mất cân bằng TX cao bằng 30 decibels so với sóng mang (dBc), ví dụ, hiệu số giữa mức độ lớn 81 của tín hiệu mong muốn và mức độ lớn 83 của các sự giảm sút do mất cân bằng cao bằng 30 dB.

Các thuật toán nêu trên được sử dụng để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ. Kết quả là, các tín hiệu $s_p(n)$ và $s_p^*(n)$ được truyền và sau đó được nhận để tạo ra các bề mặt lọc bù đối với bộ truyền và bộ nhận. Dữ liệu từ thiết bị thử nghiệm 12 được giữ lại cho các tần số RF nằm trong khoảng từ 1500 đến 5600 MHz ở các bước 100-MHz. Độ rộng dải tần dải gốc đối với mỗi tần số RF giữ lại được là 250 MHz. Các bề mặt bộ truyền và bộ nhận 86, 92 được thể hiện lần lượt trên Fig.8A và Fig.9A. Như được thể hiện trên Fig.8A và Fig.9A, các sự theo dõi chứa các nhiễu đáng kể 87, 93. Nhiễu này chủ yếu là do các tạp nhiễu RF và nhiễu nhiệt được đưa vào ở bộ truyền và bộ nhận. Do bộ lọc bù phải được tính ở tần số RF bất kỳ cần quan tâm, nên các bộ lọc này được điều chỉnh phù hợp sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất cho hàm đa thức nhiều biến, như được mô tả trên đây. Hàm đa thức này tạo các bề mặt 88, 94 được thể hiện trên Fig.8B và Fig.9B. Cần hiểu rằng các bề mặt 88, 94 không chứa nhiễu 87, 93 của các bề mặt theo dõi 86, 92, một cách tương ứng.

Phương pháp thứ nhất để ước lượng các bộ lọc bù ở tần số RF mục tiêu bằng cách điều chỉnh phù hợp tất cả các bộ lọc bù ở các tần số RF theo dõi sử dụng hàm đa thức bề mặt 88 được mô tả trên đây. Fig.8B thể hiện sự phù hợp bề mặt 88 đối với tất cả các bộ lọc bù được ước lượng dựa trên các sự theo dõi được giữ lại trong bề mặt bộ truyền 86 trên Fig.8A. Để chứng minh rằng các bộ lọc phức bù thu được từ hàm đa thức làm giảm các ảnh mất cân bằng IQ, tín hiệu nhiều sóng sin phức bù trước được truyền ở một số tần số RF khác với các tần số được sử dụng trong suốt quá trình theo dõi. Phương pháp này làm giảm đáng kể các ảnh mất cân bằng IQ do sự phù hợp hàm

đa thức là rất sát với các phép đo ban đầu. Việc bù trước tín hiệu TX với bộ lọc bù được ước lượng nhờ sử dụng hàm đa thức khử các ảnh IQ cho hầu hết các tần số RF đến các giá trị nhỏ hơn 55 dBc. Tuy nhiên, trong một số trường hợp, các ảnh cao bằng 51 dBc được đo. Do mong muốn các ảnh nhỏ hơn 60 dBc, nên hàm đa thức mà phù hợp chỉ bề mặt cục bộ (tức là, khoảng tần số giới hạn) được ưu tiên. Các đồ thị ví dụ 90, 96 trên Fig.8C và Fig.9C lần lượt minh họa sự phù hợp các bề mặt bộ truyền và bộ nhận cục bộ. Theo đó, việc lưu trữ các bộ lọc phức được ước lượng ở các tần số RF được theo dõi được mong muốn để căn chỉnh. Các thông số được sử dụng để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ đối với sự phù hợp cục bộ được tổng kết trong bảng 1 trên Fig.6.

Sự phù hợp cục bộ của bốn tần số RF theo dõi quanh tần số RF để bù được sử dụng để tạo ra đáp tuyến được thể hiện trên Fig.10A. Các hình ảnh thấp bằng 58 dBc được đo tại bộ phân tích phổ bên ngoài. Để làm giảm thêm các ảnh này, các sự theo dõi từng 50 MHz quanh các điểm để căn chỉnh được giữ lại. Điều này làm giảm độ lớn ảnh mất cân bằng IQ TX đến các giá trị nhỏ hơn 60 dBc. Fig.10A thể hiện đồ thị ví dụ 98 minh họa phổ 100 của các ảnh có sự mất cân bằng TX ở tần số 5,125 GHz. Như được minh họa, ví dụ, bởi thành phần 102, ảnh cao nhất là -61,7 dBc ở độ rộng dải tần 200-MHz, ví dụ, sự chênh lệch giữa độ lớn 116 của tín hiệu mong muốn và độ lớn 118 của ảnh mất cân bằng cao nhất ít nhất là bằng 60 dB. Cần hiểu rằng các tạp nhiễu 104 ở tần số -80 MHz không phải là do các sự giảm sút do mất cân bằng IQ TX. Điều này có nghĩa là việc nâng lên lớn hơn 30 dB đối với sự suy giảm ảnh so với các ảnh TX không bù ở cùng tần số được minh họa bởi thành phần 84 trên Fig.7. Điều quan trọng cần nêu bật là các tạp nhiễu ở các tần số khác nhỏ hơn 65 dBc.

Mặc dù các thành phần chéo được sử dụng cho sự phù hợp hàm đa thức, nhưng không có sự chênh lệch đo được khi so với các hàm đa thức mà chỉ sử dụng các biến độc lập giữa trục tần số RF và trục dải gốc. Điều này được mong đợi do các thông số này sẽ là độc lập.

Fig.10B và Fig.10C lần lượt thể hiện các đồ thị ví dụ 106, 108 của đầu ra sau khi bù trước trong bộ truyền và bù sau trong bộ nhận. Các ảnh sau khi bù trong độ rộng dải tần dải gốc là 160 MHz nhỏ hơn 60 dBc, ví dụ, được minh họa bởi sự chênh

lệch tương đối giữa mức độ lớn không (0) dB và mỗi trong số các mức độ lớn 110 và 112 trên Fig.10B và Fig.10C, tương ứng. Tần số 160 MHz được đưa vào bởi bộ nhận. Cần hiểu rằng tạp nhiễu 114 ở tần số -8,9 MHz trên Fig.10C không phải là do sự mất cân bằng IQ.

Như được thảo luận trên đây, các hình vẽ từ Fig.7 đến Fig.10C minh họa sự loại trừ mất cân bằng IQ cho các tín hiệu được bù trước và được bù sau trong thiết bị thử nghiệm 12. Việc khử các ảnh IQ lớn hơn 60 dBc thu được đối với cả bộ truyền 14 lẫn bộ nhận 16. Ví dụ, để đạt được mức khử đó, các độ rộng dải tần dải gốc được đòi hỏi cho bộ truyền 14 và bộ nhận 16 lần lượt là 200 MHz và 160 MHz. Các kết quả này thể hiện các sự nâng cao so với việc khử ảnh 52 dBc được quy định bởi bộ tạo tín hiệu M9381A PXIe Vector, mà có sẵn trên thị trường từ Keysight Technologies, Inc.

Theo một phương án minh họa, quy trình bù bao gồm các bước sau đây:

- 1) Nối bộ nhận 16 và bộ truyền 14;
- 2) Bù các bộ lọc dải gốc sử dụng phương pháp chuỗi nhiễu giả (pseudo-noise - PN). *Xem*, ví dụ, Vergel, Julio và Roberts, Jean. Nghiên cứu các tín hiệu khác thích hợp để thu được tần số của hệ thống thời gian bất biến tuyến tính (LTI) ổn định chưa biết, đối với phương pháp chuỗi PN làm ví dụ (Study of different signals suitable to obtain the frequency of an unknown stable linear time-invariant (LTI) system, for an exemplary PN sequence method);
- 3) Bù độ dịch một chiều (direct current - DC) trong bộ truyền và bộ nhận;
- 4) Thiết lập tần số RF bộ truyền, f_{tx} , đến tần số mong muốn để ước lượng việc bù và tần số RF bộ nhận ở $f_{rx} = f_{tx} - 2$ MHz;
- 5) Truyền các tín hiệu $s_p[n]$, $s_p^*[n]$, $s_{p,\Delta}[n]$, và $s_{p,\Delta}^*[n]$. Lưu các tín hiệu nhận được;
- 6) Thiết lập tần số RF bộ truyền, f_{tx} , đến tần số mong muốn để ước lượng việc bù và tần số RF bộ nhận ở $f_{rx} = f_{tx} - 4$ MHz;
- 7) Truyền sóng sin phức và liên hợp của nó ($s_{tone}[n]$, $s_{tone}^*[n]$);

- 8) Sử dụng các sự theo dõi để ước lượng các bộ lọc bù bộ truyền và bộ nhận; và
- 9) Nạp các bộ lọc vào FPGA và bắt đầu thử nghiệm.

Theo một số phương án, người dùng cũng có thể xác minh rằng các ảnh mất cân bằng IQ nhỏ hơn hoặc bằng 60 dBc sau khi các bộ lọc được nạp vào FPGA.

Cuối cùng, quy trình căn chỉnh được đưa vào dựa trên các thuật toán để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ. Để xác định giá trị khử ảnh IQ cuối cùng, thiết bị thử nghiệm 12 còn có thể được tạo cấu hình để đo việc khử sự mất cân bằng IQ nếu số lần theo dõi trong dải gốc (N) tăng lên (ví dụ, từ 125 đến 250), đo việc khử sự mất cân bằng IQ nếu khoảng RF được giảm đi (ví dụ, từ 50 MHz đến 25 MHz), đo sự mất cân bằng IQ đối với các bộ tạo mới, kiểm tra các sự thay đổi của việc khử sự mất cân bằng IQ với nhiệt độ, và/hoặc thử nghiệm sự mất cân bằng IQ đối với nhiều tần số RF hơn để đảm bảo việc khử ảnh IQ ít nhất 60 dB IQ.

C. Các giao diện phần mềm

Có ba bộ giao diện phần mềm được cung cấp cho việc thực thi C++ của thuật toán này: Bộ tạo sóng sin phức, ước lượng và bù mất cân bằng TX, và ước lượng và bù mất cân bằng RX.

1) *Bộ tạo sóng sin phức – AlgGenMultiSineInterface*: Trong phương án minh họa, giao diện này tạo ra các tín hiệu nhiều sóng sin và tổng phức hợp để được truyền từ bộ truyền như được chỉ rõ trong ít nhất là các phương trình (8), (9), và (10). Nhờ sử dụng các giá trị trong bảng 1 được thể hiện trên Fig.6, các bước để tạo các tín hiệu yêu cầu là:

- 1) Tạo các sóng sin đa phức, ví dụ, theo phương trình (8), ở các tần số $[0, 3/125, \dots, 123/125]$, $[0, -3/125, \dots, -123/125]$, $[1/125, 4/125, \dots, 124/125]$, $[-1/125, -4/125, \dots, -124/125]$, $[2/125, 5/125, \dots, 122/125]$, $[-2/125, -5/125, \dots, -122/125]$ trong hai bước:
 - a) Đối với mỗi tập hợp nhiều sóng sin phức:
 - i) Thiết lập pha ban đầu về không (zero) đối với tất cả các tần số sin trong tín hiệu nhiều sóng sin sử dụng phương pháp

SetInitialPhases; và

ii) Gọi toán tử () trong đó đầu ra sẽ được tạo và các tần số được chuẩn hóa.

b) Đối với mỗi tập hợp các sóng sin đa phức, tạo ra các tín hiệu mất cân bằng, ví dụ, theo phương trình (9).

2) Tạo ra các tông đơn lẻ

Mã giả (pseudo-code) làm ví dụ cho bộ tạo sóng sin được thể hiện trong thuật toán 1.

Thuật toán 1 Mã giả để tạo các tín hiệu

```

auto gen=Ngmp::DSP::AlgGenMultiSineFast< float,
std::complex< float >>::Create();

k=0

for (k<K)
{
    frequencySet=[k:3:125)//Tạo k tập hợp các tần số;
    vectorInit=0 //Khởi tạo các pha về không (zero)
    gen.SetInitialPhases(vectorInit);
    (*gen)(outputPos,frequencySet) // Nhiều dương
    (*gen)(outputNeg,frequencySet) // Nhiều âm
    outputImbPos = real(outputPos)+2*imag(outputPos);
    outputImbNeg
                                =
    real(outputNeg)+2*imag(outputNeg);
}

frequencySet=[1]

(*gen)(outputTonePos,frequencySet) // Tông dương

```

```
(*gen)(outputToneNeg,-frequencySet) // Tông âm
```

```
//Tạo các tín hiệu mất cân bằng cho các tông
```

2) *Giao diện ước lượng mất cân bằng TX*: Trong phương án minh họa, sự mất cân bằng bộ truyền có tám phương pháp chính có thể được sử dụng để ước lượng và bù sự mất cân bằng IQ TX. Giao diện TX và RX lần lượt được xác định bởi các lớp `AlgRxImbalanceDeWittInterface` và `AlgTxImbalanceDeWittInterface`. Các bước này bao gồm:

- Thiết lập số lượng sóng sin phức mà được truyền (N). Hiện nay, số lượng theo dõi là $N=250$.
- Thiết lập độ dịch tần số giữa bộ nhận và bộ truyền trong các mẫu phổ. Do kích thước FFT giống như số lượng theo dõi, nên độ lệch trong các mẫu phổ là sao cho $\frac{f_{offset}f_{sampling}}{N}$. Do tần số lấy mẫu là 250 MHz, nên độ dịch trong các mẫu phổ sẽ là sao cho $f_{bins} = \frac{250f_{offset}}{N} = 1$.
- Thiết lập sự mất cân bằng đối với tín hiệu mất cân bằng yêu cầu để được truyền. Hiện nay, sự mất cân bằng là 2.
- Đối với mỗi tần số RF
 - Tạo cấu trúc của loại `RxSignal` và lấp đầy nó bằng các tín hiệu nhận được;
 - Tính toán đáp tuyến tần số của bộ lọc bù đối với tần số RF; và
 - Lưu trữ đáp tuyến tần số trong ma trận trong đó các hàng là các tần số RF và các cột là các đáp tuyến tần số.
- Tính toán đa thức bề mặt mà bù một số tần số RF đi qua ma trận và vector của các tần số RF.
- Truyền tín hiệu nhiều tông sử dụng hai phần đối với bộ lọc bù để xác định dấu của phần ảo của bộ lọc bù.

a) *void SetNumberOfObservations (std::int32_t numberOfObservations):*

Phương pháp được sử dụng để thiết lập tổng số lượng tông được truyền ở một tần số RF cụ thể. Ví dụ, đối với các phép đo từng 1 MHz trong dải gốc đã cho, 250 sự theo dõi được yêu cầu đối với độ rộng dải tần dải gốc 250 MHz.

b) *void SetFrequencyOffsetTxRxInBins (std::int32_t frequencyOffsetMultiTxRxToSet , std::int32_t frequencyOffsetToneTxRxToSet):* Chỉ ra khoảng cách trong các mẫu phổ giữa các bộ trộn RX và TX đối với tín hiệu nhiều sóng sin và tín hiệu một tông. Giá trị là một (1) sẽ được thiết lập cho độ dịch 1 MHz giữa các tần số RX và TX và 250 sự theo dõi trong độ rộng dải tần 250 MHz.

c) *void SetAmplitudeImbalance (GeneralType amplitudeImbalanceToSet):* Phương pháp SetAmplitudeImbalance được sử dụng để thiết lập sự mất cân bằng biên độ của tín hiệu với sự mất cân bằng IQ được đòi hỏi bởi thuật toán. Hiện nay, hai (2) được sử dụng làm giá trị của sự mất cân bằng biên độ.

d) *ViaviAvCommDSP::Signal< InputType > operator()(const RxSignals &rxSignals):* Toán tử này tính đáp tuyến tần số của bộ lọc phức mà bù sự mất cân bằng IQ TX đối với tần số RF cụ thể. RxSignal là cấu trúc bao gồm tất cả các tín hiệu cần để ước lượng bộ lọc phức bù sự mất cân bằng IQ TX.

e) *ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > operator() (ViaviAvCommDSP::ConstSignal < GeneralType > rfFrequencies , ViaviAvCommDSP::ConstMatrix2D < InputType > rxSignals):* Toán tử này tính bề mặt phương trình đa thức cho các sự theo dõi trong ma trận *rxSignals* ở các tần số RF *rfFrequencies*. Ma trận và vector có quan hệ như sau:

$$\begin{bmatrix} f_{rf_0} \\ f_{rf_1} \\ \vdots \\ f_{rf_{N-1}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} f_{B_{00}} & f_{B_{01}} & \cdots & f_{B_{0(M-1)}} \\ f_{B_{10}} & f_{B_{11}} & \cdots & f_{B_{1(M-1)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{B_{(N-1)0}} & f_{B_{(N-1)1}} & \cdots & f_{B_{(N-1)(M-1)}} \end{bmatrix}$$

Đối với tần số RF đã cho, f_{rf_i} , đáp tuyến lọc bù dải gốc được đưa ra bởi hàng $[f_{B_{i0}} f_{B_{i1}} \cdots f_{B_{i(M-1)}}]$. Đáp tuyến lọc bù dải gốc, đối với tần số RF đã cho, f_{rf_i} , sẽ được

ước lượng nhờ sử dụng toán tử trong phần VI-B4.

f) *ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > GetCompensatorImpulseResponse (ViaviAvCommDSP::Signal< InputType > frequencyResponse , const std::uint32_t filterLength , const std::uint32_t polyOrder)* : Trả lại đáp ứng xung đối với đáp tuyến tần số đã cho.

g) *GetCompensatorImpulseResponse (ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > polynomialFunction , float frequencyRF , const std::uint32_t filterLength)*: Giao diện để tạo bộ lọc đáp ứng xung của độ dài bộ lọc mà bù sự mất cân bằng IQ ở tần số RF *frequencyRF* sử dụng bề mặt đa thức được cho bởi *polynomialFunction*.

h) *ViaviAvCommDSP::ConstSignal< std::int16_t > DetermineSignImaginaryTx(const FrequencySide side , ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > input , ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > inputConj)*: Xác định dấu của phần ảo đối với mỗi tần số tông. *Input* và *InputConj* sẽ là các sự theo dõi ở cùng các tần số được sử dụng để xác định sự mất cân bằng IQ.

Mã giả làm ví dụ để ước lượng bộ lọc bù sự mất cân bằng IQ được thể hiện trong thuật toán 2.

Thuật toán 2 Mã giả (Pseudo code) để ước lượng sự mất cân bằng TX

```
auto txImb=Ngmp::DSP::AlgTxImbalanceDeWittNoPhase
< float , std::complex< float > >::Create()

txImb->SetFrequencyOffsetTxRxInBins( 1 , 2 ); //thiết lập các
đenta

giữa RX & TS

txImb->SetNumberOfObservations( 250 );//Thiết lập tổng số
lượng các sóng sin

txImb->SetAmplitudeImbalance( 2 );//Thiết lập sự mất cân bằng
Tx
```

//Tạo cấu trúc tín hiệu với tất cả các tông nhận được ở tần số RF
đã cho

```

typename Ngmp::DSP::AlgTxImbalanceDeWittInterface
<GeneralType,InputType>::RxSignals mySignals;

mySignals.tone[AlgDeWittIf::positive]=tonePos;

mySignals.tone[AlgDeWittIf::positiveImbalanced]=tonePosImb;

mySignals.tone[AlgDeWittIf::negative]=toneNeg;

mySignals.tone[AlgDeWittIf::negativeImbalanced]=toneNegImb;

mySignals.multiTones[0][positive]=inputPos0;

mySignals.multiTones[0][positiveImbalanced]=inputPosImb0;

mySignals.multiTones[0][negative]=inputNeg0;

mySignals.multiTones[0][negativeImbalanced]=inputNegImb0;

mySignals.multiTones[1][positive]=inputPos1;

mySignals.multiTones[1][positiveImbalanced]=inputPosImb1;

mySignals.multiTones[1][negative]=inputNeg1;

mySignals.multiTones[1][negativeImbalanced]=inputNegImb1;

mySignals.multiTones[2][positive]=inputPos2;

mySignals.multiTones[2][positiveImbalanced]=inputPosImb2;

mySignals.multiTones[2][negative]=inputNeg2;

mySignals.multiTones[2][negativeImbalanced]=inputNegImb2;

freqTx = (*objectToTest)( mySignals ); //Ước lượng đáp tuyến
tần số của bộ bù

//Lấy đáp tuyến lọc nhưng điều chỉnh phù hợp trước tiên với hàm
đa thức.

const std::uint32_t polyOrder = 8; // Thiết lập thứ tự

```

```
const std::uint32_t desiredFilterLength = 31;

auto freqTxImpulse=txImb->GetCompensatorImpulseResponse(
    freqTx , desiredFilterLength , polyOrder );
```

3) *Giao diện ước lượng mất cân bằng RX*: Trong phương án minh họa, giao diện bộ nhận (RX) có sáu phương pháp để ước lượng và bù sự mất cân bằng RX.

a) `void SetNumberOfObservations( const std::int32_t numberOfObservationsToSet )`: Phương pháp được sử dụng để thiết lập tổng số lượng tông được truyền đối với một tần số RF cụ thể. Ví dụ, đối với các phép đo từng 1 MHz trong dải gốc đã cho, 250 sự theo dõi được yêu cầu đối với độ rộng dải tần dải gốc 250 MHz.

b) `void SetFrequencyOffsetTxRxInBins( std::int32_t frequencyOffsetMultiTxRxToSet , std::int32_t frequencyOffsetToneTxRxToSet )`: Chỉ ra khoảng cách trong các mẫu phổ giữa các bộ trộn RX và TX đối với tín hiệu nhiều sóng sin và tín hiệu một tông. Giá trị là một (1) sẽ được thiết lập cho độ dịch 1 MHz giữa các tần số Rx và TX và 250 sự theo dõi trong độ rộng dải tần 250 MHz.

c) `ViaviAvCommDSP::Signal< InputType > operator()( const RxSignals &rxSignals )`: Toán tử này tính đáp tuyến tần số của bộ lọc phức mà bù sự mất cân bằng IQ Rx đối với tần số RF cụ thể. RxSignal là cấu trúc bao gồm tất cả các tín hiệu cần để ước lượng bộ lọc phức bù sự mất cân bằng IQ Rx. Đầu ra của toán tử này, bộ lọc bù ở RF cụ thể, sẽ được sử dụng trong các giai đoạn sau đó.

d) `ViaviAvCommDSP::Signal < InputType > operator ()( ViaviAvCommDSP::ConstSignal < GeneralType > rfFrequencies , ViaviAvComm DSP::ConstMatrix2D < InputType > rxSignals )`: Toán tử này tính bề mặt phương trình đa thức đối với các sự theo dõi trong ma trận rxSignals ở các tần số RF *rfFrequencies*. Ma trận và vectơ có quan hệ như sau:

$$\begin{bmatrix} f_{rf_0} \\ f_{rf_1} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{rf_{N-1}} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} f_{B_{00}} & f_{B_{01}} & \cdots & f_{B_{0(M-1)}} \\ f_{B_{10}} & f_{B_{11}} & \cdots & f_{B_{1(M-1)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{B_{(N-1)0}} & f_{B_{(N-1)1}} & \cdots & f_{B_{(N-1)(M-1)}} \end{bmatrix}.$$

Đối với tần số RF đã cho, f_{rf_i} đáp tuyến lọc bù dải gốc được đưa ra bởi hàng $[f_{BB_{i0}} f_{BB_{i1}} \cdots f_{BB_{i(M-1)}}]$. Đáp tuyến bộ lọc bù dải gốc, đối với tần số RF đã cho, f_{rf_i} , sẽ được ước lượng nhờ sử dụng toán tử trong phần VI-C3.

e) *ViaviAvCommDSP::Signal* < *InputType* >
GetCompensatorImpulseResponse(ViaviAvCommDSP::Signal < *InputType* >
frequencyResponse , *const std::uint32_t filterLength* , *const std::uint32_t polyOrder*) :

Trả lại đáp ứng xung đối với đáp tuyến tần số đã cho.

f) *GetCompensatorImpulseResponse(ViaviAvCommDSP::Signal* < *InputType* >
polynomialFunction , *float frequencyRF* , *const std::uint32_t filterLength*)

Giao diện để tạo bộ lọc đáp ứng xung của độ dài bộ lọc mà bù sự mất cân bằng IQ ở tần số RF sử dụng bề mặt đa thức được cho bởi *polynomialFunction*.

Mặc dù sáng chế đã được minh họa và mô tả chi tiết trong các hình vẽ và phần mô tả trên đây, nhưng sự minh họa và mô tả này cần được coi là ví dụ và không giới hạn về đặc tính, cần hiểu rằng chỉ các phương án minh họa đã được thể hiện và mô tả và tất cả các sự thay đổi và cải biến nằm trong mục đích của sáng chế được mong muốn bảo hộ.

Có nhiều ưu điểm của sáng chế xuất hiện từ các dấu hiệu khác nhau của phương pháp, thiết bị, và hệ thống được mô tả ở đây. Cần lưu ý rằng các phương án thay thế của phương pháp, thiết bị, và hệ thống theo sáng chế có thể không bao gồm tất cả các dấu hiệu được mô tả nhưng vẫn đạt được lợi ích từ ít nhất một số ưu điểm của các dấu hiệu này. Người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực tương ứng có thể dễ dàng nghĩ ra các cách thực hiện của chính họ về phương pháp, thiết bị, và hệ thống mà kết hợp một hoặc nhiều dấu hiệu của sáng chế và nằm trong mục đích và phạm vi của sáng chế như được xác định bởi yêu cầu bảo hộ kèm theo.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Thiết bị thử nghiệm (10), thiết bị này bao gồm:

bộ truyền (14) được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu đến bộ phận được thử nghiệm;

bộ nhận (12) được tạo cấu hình để nhận các tín hiệu từ bộ phận được thử nghiệm; và

bộ điều khiển (20) được tạo cấu hình để:

tạo bộ lọc bù bộ truyền ít nhất bằng cách (i) chuyển, đến bộ truyền, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi được thử nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ nhất để bù sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (in-phase and quadrature - IQ) ở các tần số theo dõi được thử nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ nhất và bằng cách điều chỉnh phù hợp các đáp tuyến tần số thứ nhất với hàm đa thức, bề mặt đa thức của bộ truyền, và

bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, ít nhất một trong số các tín hiệu cần được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu được truyền.

2. Thiết bị thử nghiệm theo điểm 1, trong đó bộ điều khiển còn được tạo cấu hình để:

tạo bộ lọc bù bộ nhận ít nhất bằng cách (i) nhận, với bộ nhận, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ hai để bù sự mất cân bằng IQ ở các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ hai, bề mặt đa thức của bộ nhận, và

bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ nhận, ít nhất một trong số các tín hiệu sẽ được nhận bởi bộ nhận để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu nhận được, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ nhận để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong các tín hiệu nhận được.

3. Thiết bị thử nghiệm theo điểm 2, trong đó việc tạo bộ lọc bù truyền còn bao gồm việc truyền tín hiệu mất cân bằng biên độ đáp lại các pha của bộ truyền và bộ nhận không được đồng bộ hóa.
4. Thiết bị thử nghiệm theo điểm 2 hoặc điểm 3, trong đó bộ điều khiển được tạo cấu hình để tạo bộ lọc bù bộ truyền và bộ lọc bù bộ nhận đồng thời bằng cách dịch các tần số hoạt động tương ứng của bộ trộn của bộ truyền và bộ trộn của bộ nhận trong suốt quá trình truyền và nhận các tín hiệu nhiều sóng sin phức.
5. Thiết bị thử nghiệm theo điểm 4, trong đó bộ điều khiển được tạo cấu hình để dịch các tần số hoạt động tương ứng bởi bội số của kích thước mẫu phổ (bin size) của khối biến đổi Fourier nhanh (fast Fourier transform - FFT), sao cho mỗi trong số các hình sin phức và các ảnh của sự mất cân bằng IQ nằm trên mẫu phổ của khối FFT.
6. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 2 đến 5, trong đó bộ điều khiển bao gồm bộ bù sự mất cân bằng IQ bộ truyền, bộ bù sự mất cân bằng IQ bộ nhận, bộ phận hiệu chỉnh biên độ bộ truyền, bộ phận hiệu chỉnh biên độ bộ nhận, bộ phận lấy mẫu lại bộ truyền, bộ phận lấy mẫu lại bộ nhận, bộ phận thu thập, bộ phận phân xử, và ma trận định tuyến trigơ, trong đó bộ phận thu thập và bộ phận phân xử đều truyền thông với ma trận định tuyến trigơ.
7. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm trên đây, trong đó các tần số theo dõi được thứ nhất bao gồm (i) sự theo dõi thứ nhất ở tần số định trước dương khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước dương và liên hợp phức của tần số định trước dương và (ii) sự theo dõi thứ hai ở tần số định trước âm khi tín hiệu sóng sin phức được truyền ở một trong số tần số định trước âm và liên hợp phức của tần số định trước âm.
8. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm trên đây, trong đó bộ điều khiển được tạo cấu hình để truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức bằng cách truyền các tín hiệu nhiều sóng sin phức riêng rẽ vào các thời điểm khác nhau.
9. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm trên đây, trong đó bề mặt đa thức của bộ truyền bao gồm ít nhất một tần số nằm ngoài khoảng tần số dải gốc định trước.

10. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm trên đây, trong đó sự mất cân bằng IQ bao gồm các ảnh mất cân bằng IQ, và trong đó bộ điều khiển được tạo cấu hình để làm giảm các ảnh mất cân bằng IQ đến ít nhất là 60 deciben (dB) nhỏ hơn các tín hiệu cần được truyền bởi bộ truyền.

11. Thiết bị thử nghiệm theo điểm bất kỳ trong số các điểm trên đây, trong đó bộ điều khiển được tạo cấu hình để xác định bề mặt đa thức của bộ truyền bằng cách tính gần đúng hàm đa thức nhiều biến nhờ sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất.

12. Phương pháp bù sự mất cân bằng IQ, phương pháp này bao gồm các bước:

tạo, bởi bộ điều khiển (20), bộ lọc bù bộ truyền, trong đó bước tạo bộ lọc bù bộ truyền bao gồm các bước (i) chuyển, đến bộ truyền, các tín hiệu nhiều sóng sin phức để truyền qua các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ nhất để bù sự mất cân bằng đồng pha và cầu phương (IQ) ở các tần số theo dõi được thứ nhất nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ nhất và bằng cách điều chỉnh phù hợp các đáp tuyến tần số thứ nhất với hàm đa thức, bề mặt đa thức của bộ truyền, (iv) bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, tín hiệu được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền.

13. Phương pháp theo điểm 12, phương pháp này còn bao gồm các bước:

tạo bộ lọc bù bộ nhận, trong đó bước tạo bộ lọc bù bộ nhận bao gồm các bước (i) nhận, với bộ nhận, các tín hiệu nhiều sóng sin phức qua các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, (ii) ước lượng các đáp tuyến tần số thứ hai để bù sự mất cân bằng IQ ở các tần số theo dõi thứ hai nằm trong khoảng tần số dải gốc định trước, và (iii) xác định, nhờ sử dụng các đáp tuyến tần số thứ hai, bề mặt đa thức của bộ nhận.

14. Phương pháp theo điểm 13, phương pháp này còn bao gồm các bước:

bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ truyền, tín hiệu được truyền bởi bộ truyền để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức

của bộ truyền để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu được truyền; và

bù, nhờ sử dụng bộ lọc bù bộ nhận, tín hiệu được nhận bởi bộ nhận để làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu nhận được, bao gồm sử dụng bề mặt đa thức của bộ nhận để tính đáp tuyến tần số mà làm giảm sự mất cân bằng IQ trong tín hiệu nhận được.

15. Phương pháp theo điểm 13 hoặc điểm 14, trong đó bộ lọc bù bộ truyền và bộ lọc bù bộ nhận được tạo ra đồng thời bằng cách dịch các tần số hoạt động tương ứng của bộ trộn của bộ truyền và bộ trộn của bộ nhận trong suốt quá trình truyền và nhận các tín hiệu nhiều sóng sin phức.

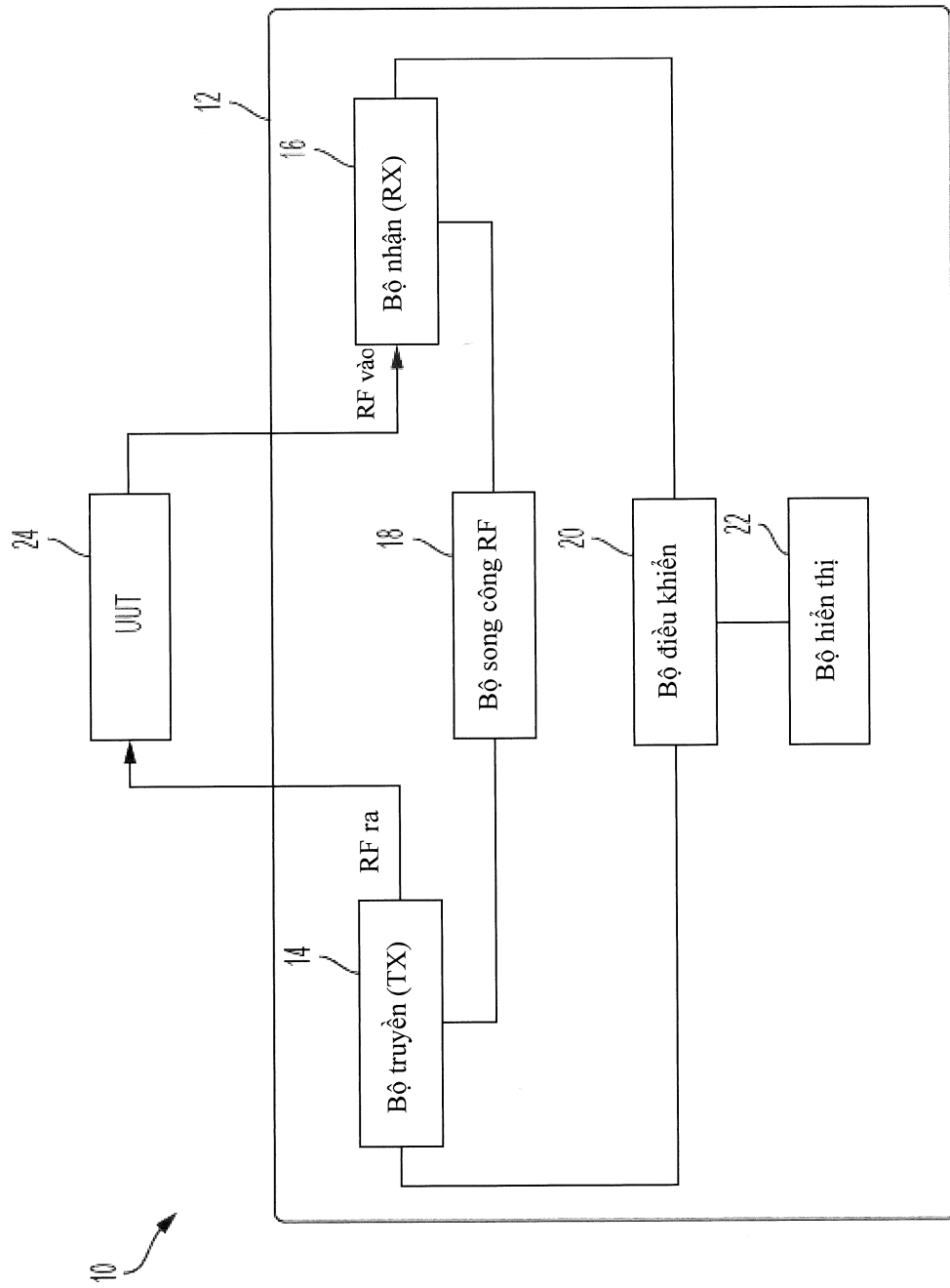


FIG. 1

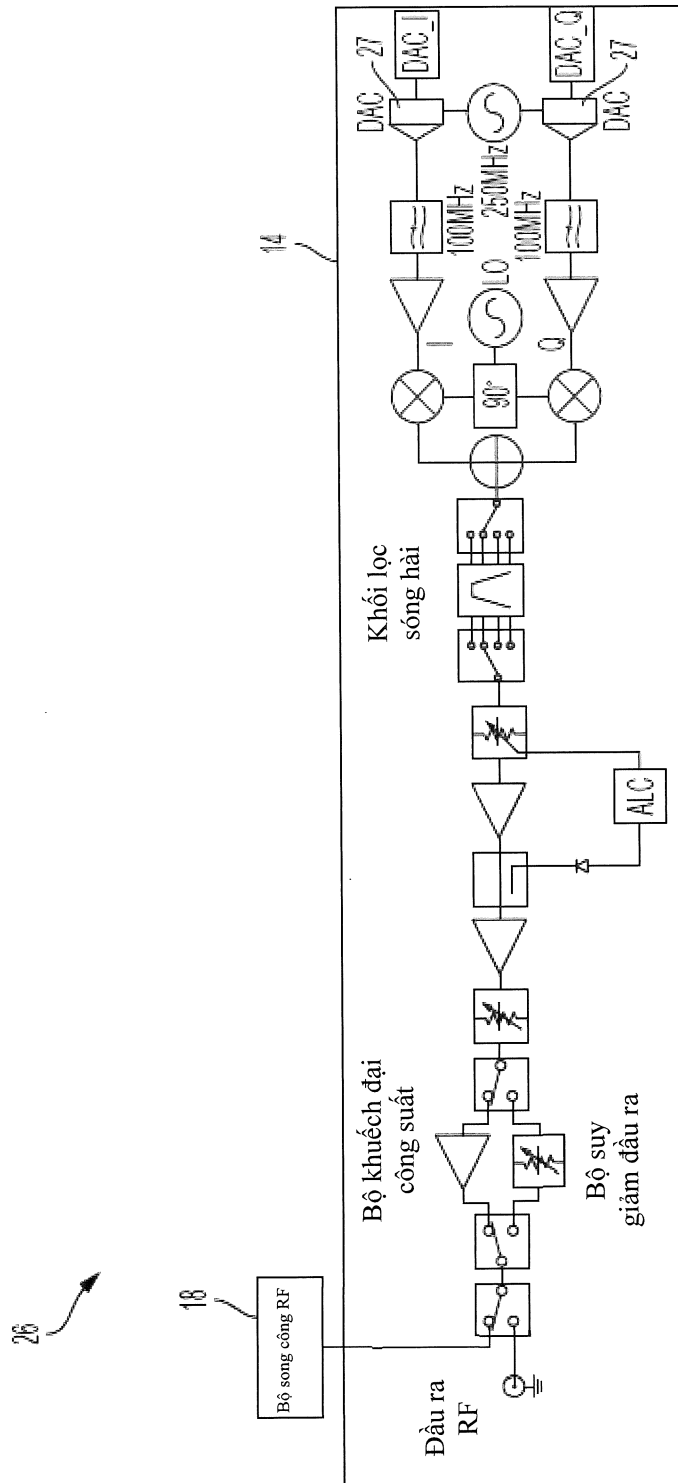


FIG. 2

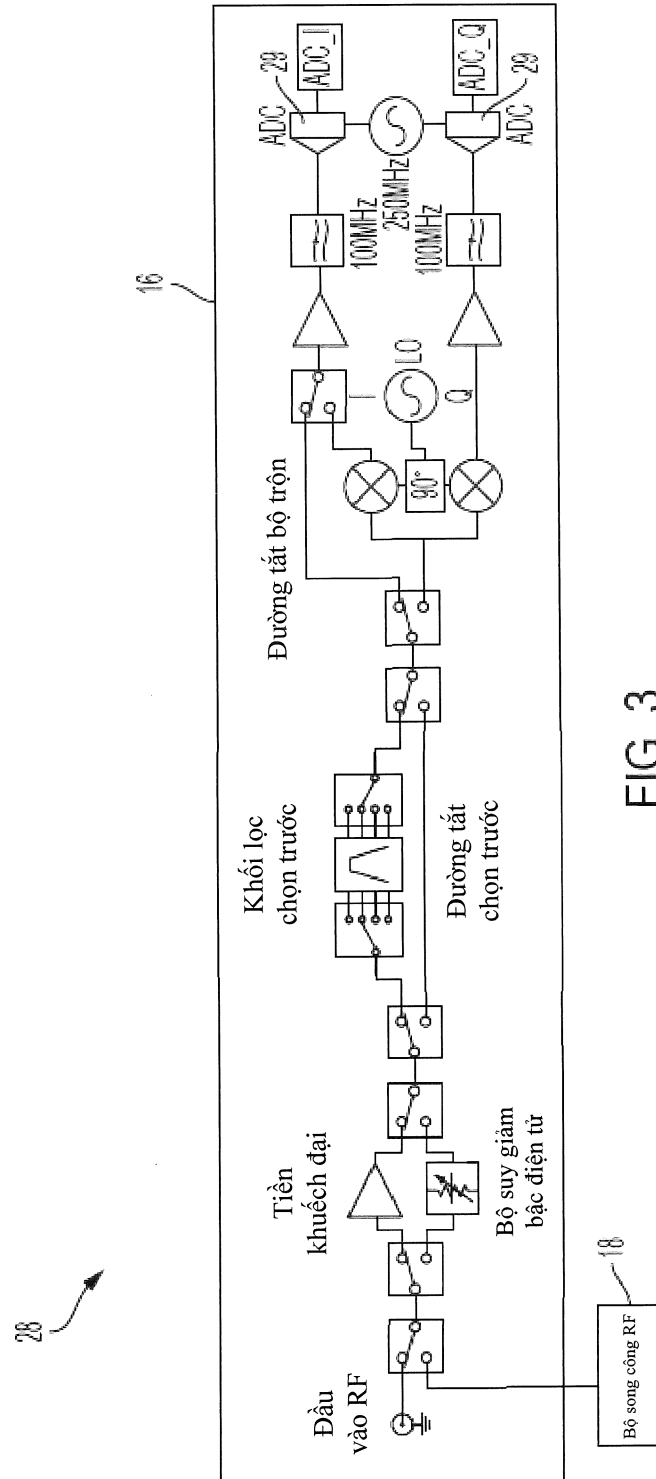


FIG. 3

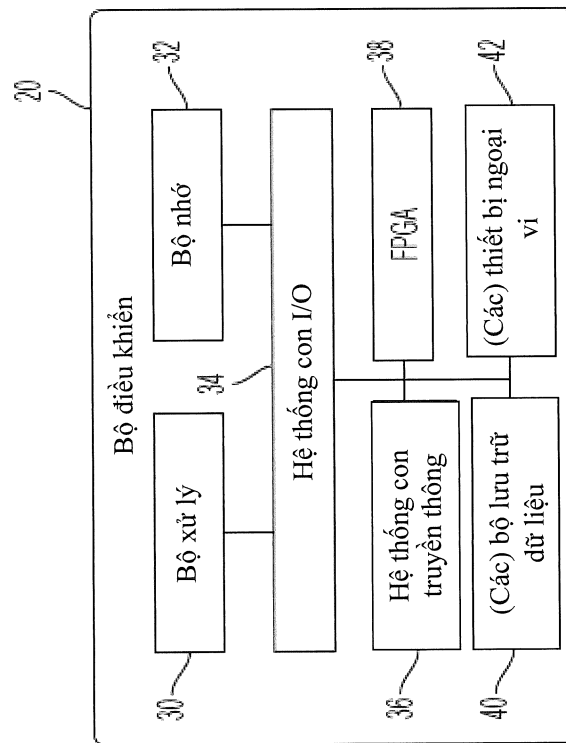


FIG. 4

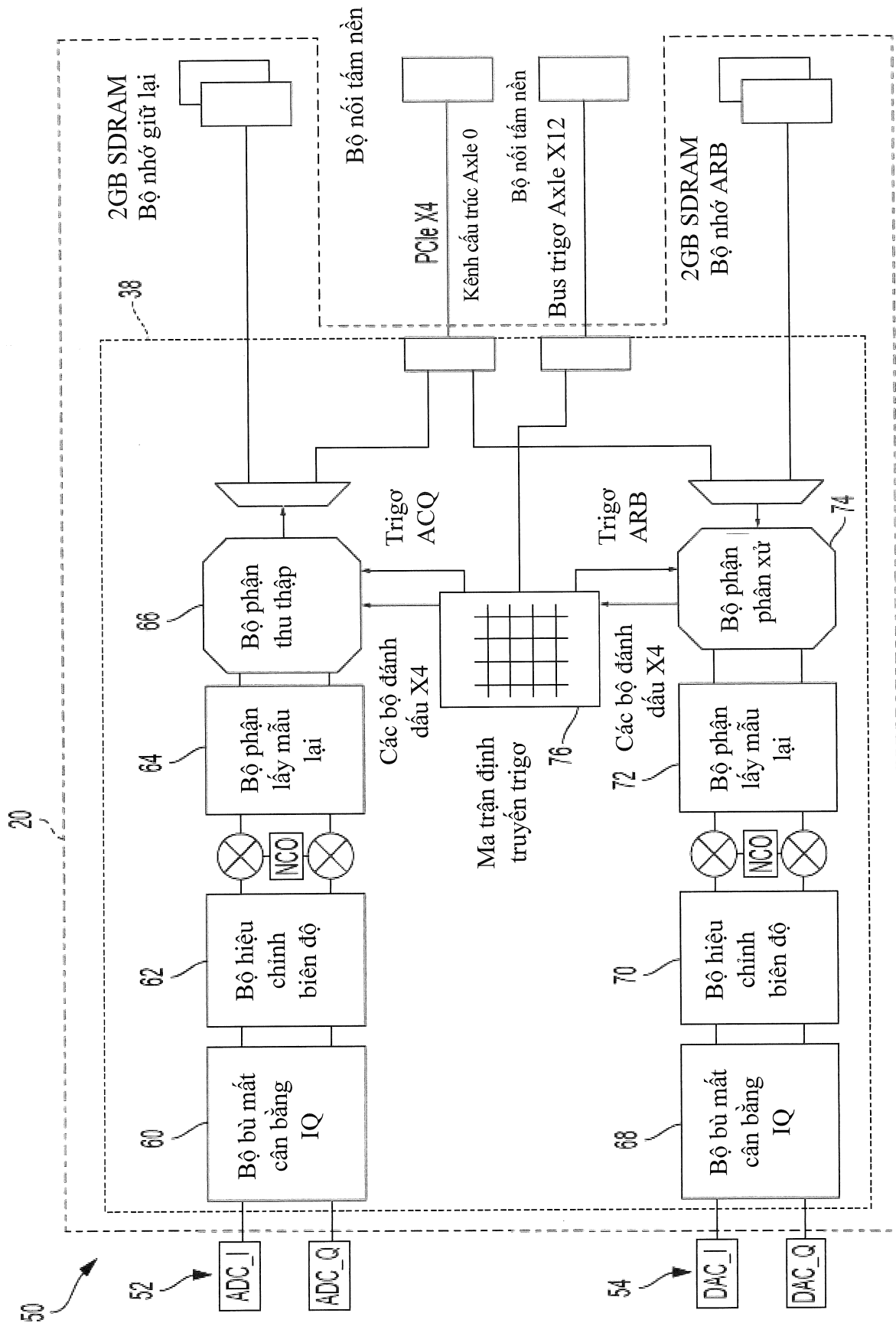
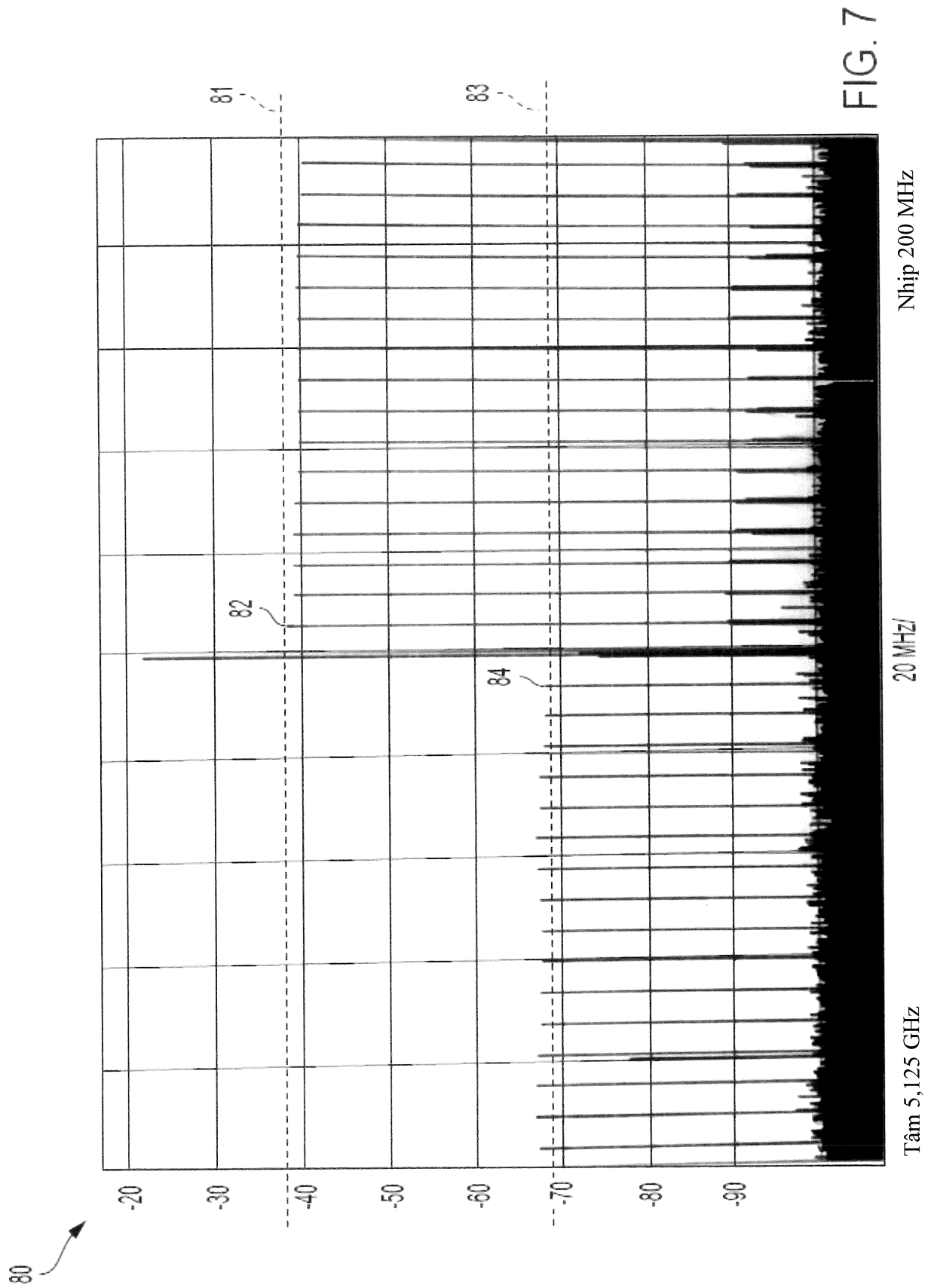


FIG. 5

Thông số	Giá trị
Độ dài bộ lọc (L)	61
Số tín hiệu (K)	3
Sự mất cân bằng biên độ TX $ \Delta\eta $	2
Các sự theo dõi (N)	125
Độ rộng dải tần (Bw)	250 MHz
$f_{step} = \frac{Bw}{N}$	2 MHz
RF interval	50 MHz
Khoảng RF	3(4)
Mức độ RF	5
Mức độ BB	42
Cửa sổ	Blackman
Các thành phần chéo	Có

Bảng 1
Các giá trị thuật toán

FIG. 6



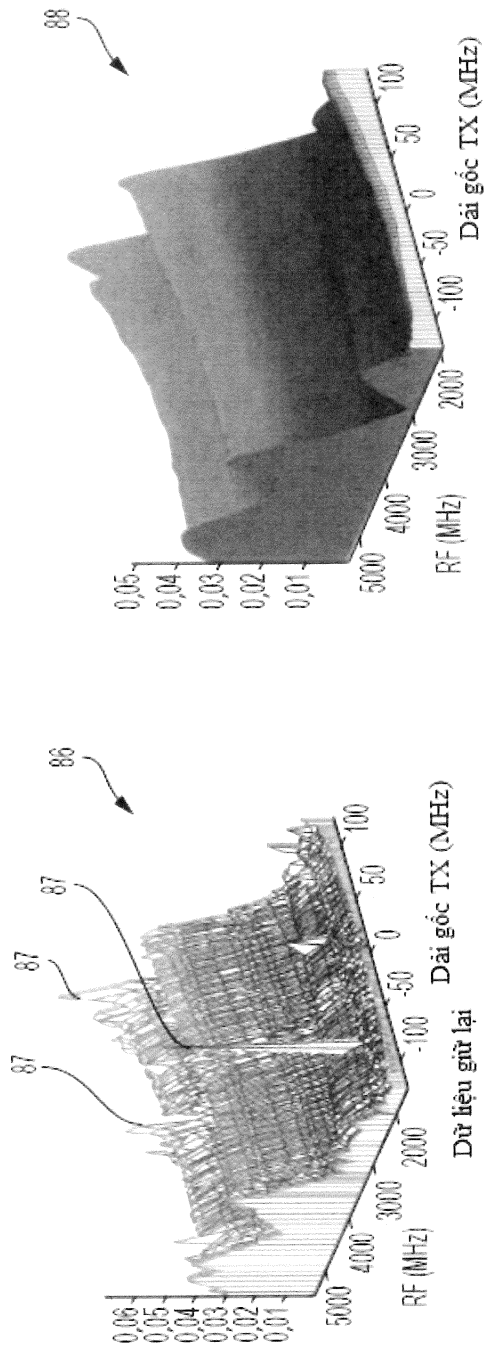


FIG. 8A

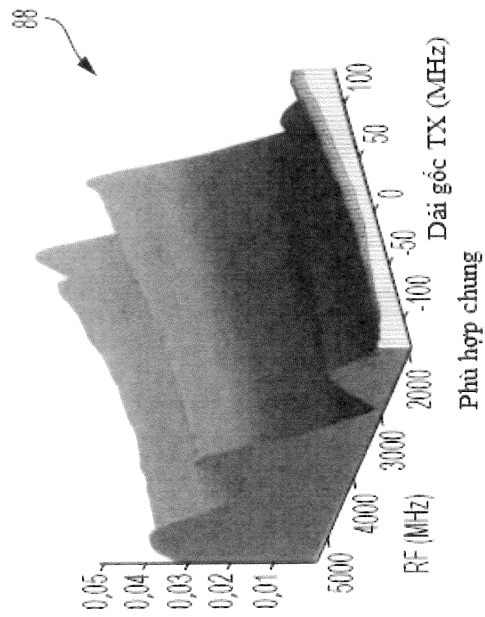


FIG. 8B

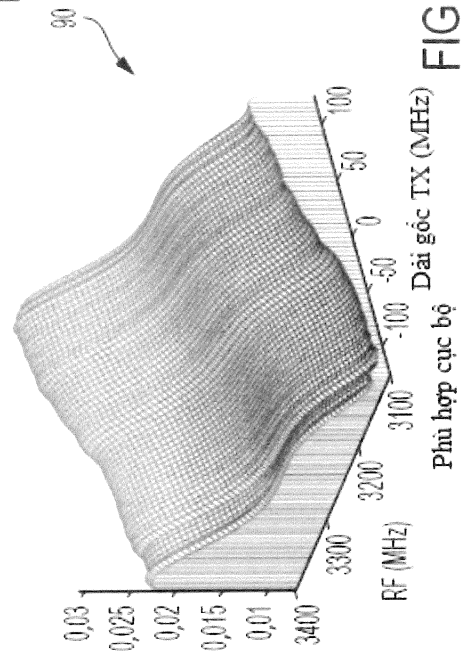


FIG. 8C

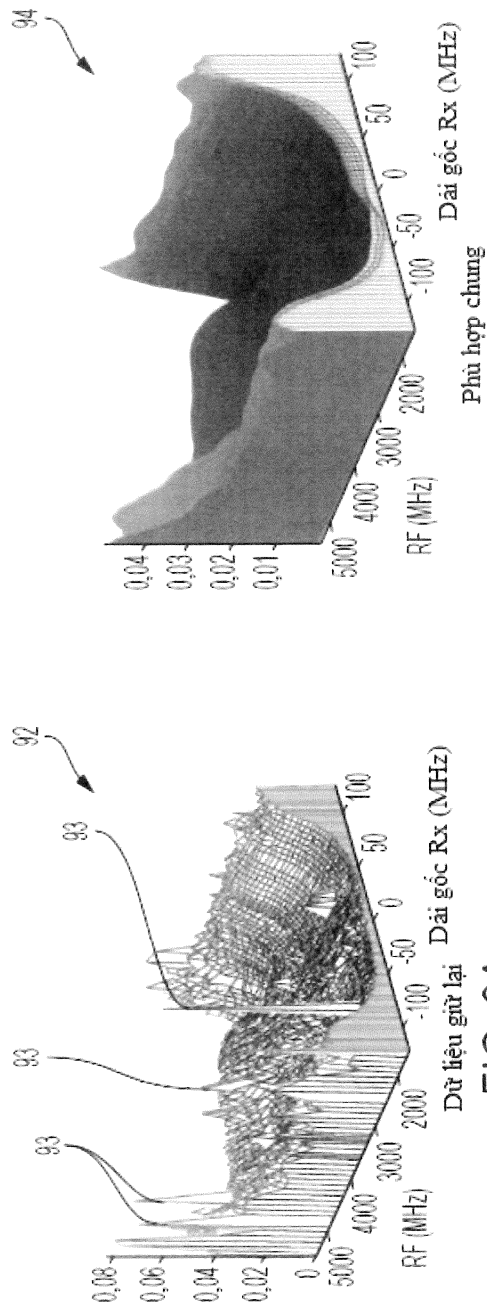


FIG. 9B

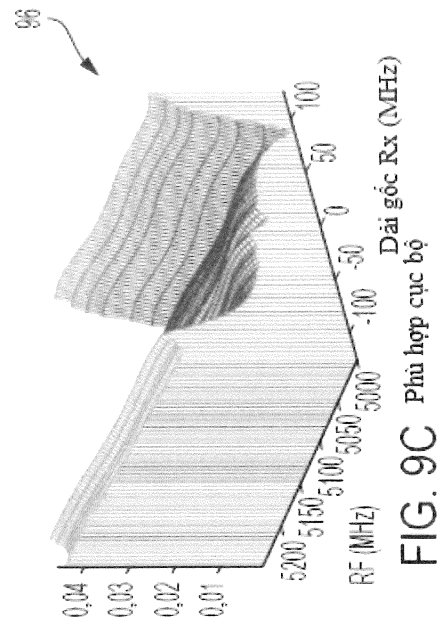


FIG. 9C

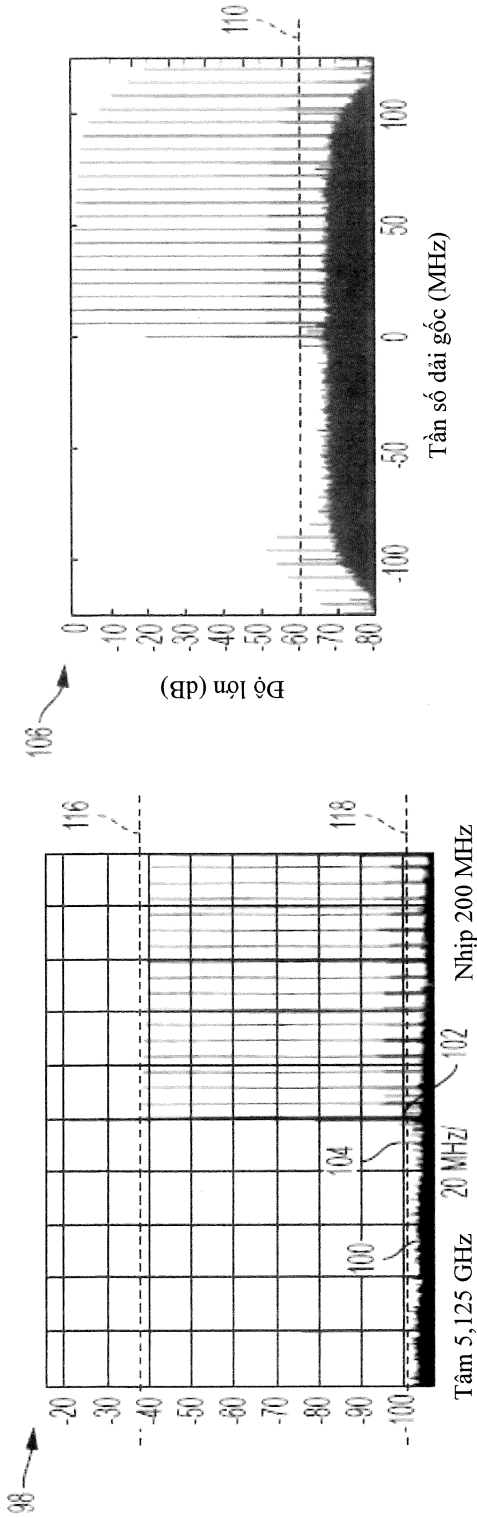


FIG. 10A

FIG. 10B

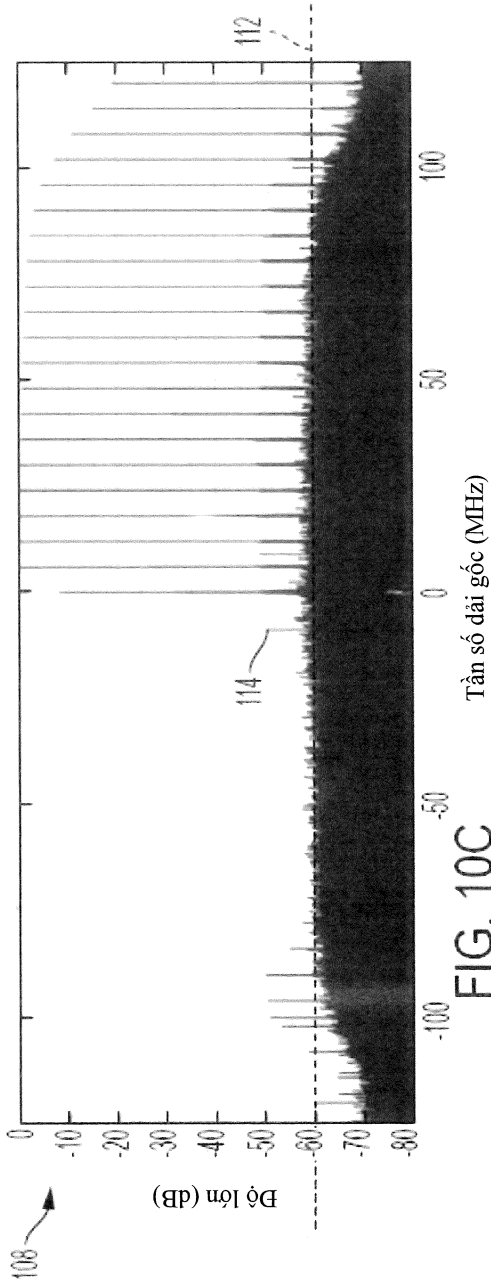


FIG. 10C