

GIẢI PHÁP GIẢM TƯƠNG QUAN GIỮA TÍN HIỆU RÒ VỚI TÍN HIỆU HIỆU CHUẨN TRONG HIỆU CHUẨN NỘI BỘ HỆ THỐNG ẮNG TEN MẢNG PHA SỐ

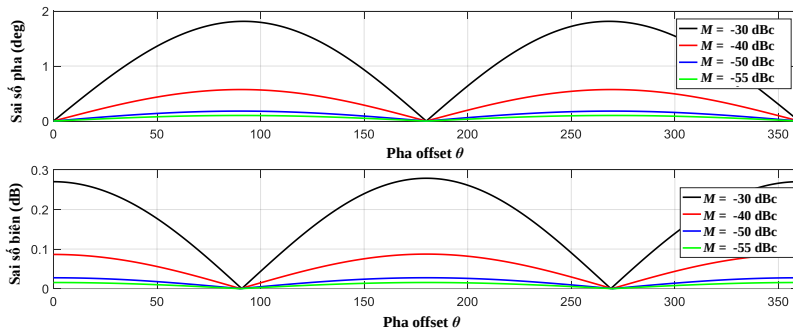
Trần Việt Hùng*, Nguyễn Hoàng Nguyên, Hoàng Minh Thiện, Phạm Việt Anh

Tóm tắt: Phương pháp hiệu chuẩn nội bộ thời gian thực cho hệ thống ăng ten mảng pha số đang được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi. Nhưng phương pháp này còn tồn tại hiện tượng rò tín hiệu trong mô-đun gây ra sai số lớn trong hiệu chuẩn và là thách thức lớn khi hiệu chuẩn với yêu cầu độ chính xác cao. Bài báo đề xuất giải pháp tạo và phân phối tín hiệu hiệu chuẩn (THHC) cho các kênh trong hiệu chuẩn thu nhằm giảm tương quan giữa tín hiệu rò và THHC, tăng độ chính xác trong hiệu chuẩn. Bằng cách tạo ra tập THHC khác nhau và ghép hai mô-đun thành một cặp trong hiệu chuẩn thu, THHC từ mô-đun này sẽ được trích sang mô-đun còn lại. Giải pháp này khắc phục được yêu cầu cần cách ly cao giữa tín hiệu rò và THHC. Hiệu quả của đề xuất được minh chứng qua mô phỏng, kết quả cho thấy đề xuất có hiệu quả cao.

Từ khóa: Hiệu chuẩn ăng ten mảng pha; Hiệu chuẩn nội bộ; Tín hiệu hiệu chuẩn; Cách ly trong hiệu chuẩn nội bộ.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Như ta biết, hiệu chuẩn các mô-đun thu phát (MĐTP) của hệ thống ăng ten mảng pha trong quá trình khai thác sử dụng là rất cần thiết [1, 2]. Với yêu cầu cao về độ chính xác, hiệu chuẩn phải thực hiện trong thời gian thực bởi vì các tham số của các MĐTP thay đổi liên tục trong quá trình hoạt động [3]. Hiệu chuẩn nội bộ là phương pháp đang được sử dụng rộng rãi để đáp ứng các yêu cầu trên. Phương pháp này có những ưu điểm như độ chính xác cao, chi phí thấp, ít mở rộng phần cứng và đơn giản trong việc thiết lập bài đo [4÷7]. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là hiện tượng rò tín hiệu trong mô-đun, gây ra sai số lớn trong hiệu chuẩn và là thách thức lớn khi hiệu chuẩn với yêu cầu độ chính xác cao [4]. Vì vậy, mô-đun cần có khả năng cách ly cao giữa các đường tín hiệu. Với yêu cầu này, khi thiết kế mô-đun cần được tính toán rất kỹ lưỡng và thử nghiệm nhiều lần để đạt được khả năng cách ly theo yêu cầu đặt ra [4, 10].



Hình 1. Sai số pha và biên độ khi rò tín hiệu hiệu chuẩn.

Tín hiệu rò chính là THHC đi theo các đường khác nhau tác động vào đường đi THHC mong muốn, đây là một loại nhiễu (gọi là “nhiễu rò”). Không giống như nhiễu tạp ngẫu nhiên, sai số do nhiễu rò không thể giảm bằng cách lấy trung bình qua nhiều lần đo. Biểu thức toán học của tín hiệu trên đường hiệu chuẩn có nhiễu rò ký hiệu là $S_{nh}(n)$, được biểu diễn như sau [4]:

$$S_{nh}(n) = (1 + Me^{j\theta})S(n) \quad (1)$$

trong đó, $S(n)$ là mẫu THHC, n là chỉ số lấy mẫu, M và θ tương ứng là biên độ (Mức cách ly) và lệch pha offset của nhiễu rò so với THHC.

Sai số pha và biên độ do nhiễu rò thể hiện trên hình 1 với các mức cách ly $M = -30 \div -55$ dBc, $\theta = 0^\circ \div 360^\circ$. Khi hiệu chuẩn yêu cầu độ chính xác cao, ta cần phải đảm bảo mức cách ly lớn hơn 55 dBc [4]. Đây là yêu cầu khó khăn khi mô-đun sử dụng trong hệ thống ăng ten mảng pha số hiện đại có kích thước nhỏ, mật độ tích hợp cao [8, 11].

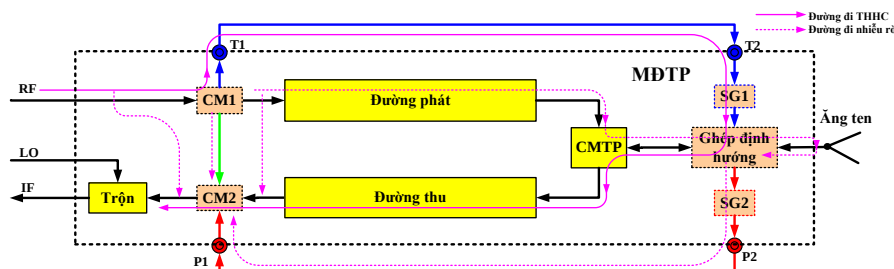
Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất giải pháp mới để khắc phục hạn chế trên trong hiệu chuẩn các kênh thu. Giải pháp đó là tạo và phân phối THHC kênh thu sao cho nhiễu rò và THHC khác nhau. Với giải pháp này, tương quan giữa nhiễu rò và THHC sẽ giảm, từ đó làm giảm yêu cầu về khả năng cách ly cao trong mô-đun. Phần 2 phân tích hiện tượng nhiễu rò trong cấu trúc một MĐTP cụ thể và trình bày giải pháp như đề xuất trên. Phần 3 minh chứng giải pháp đề xuất qua mô phỏng. Và phần cuối cùng là kết luận.

2. HIỆN TƯỢNG RÒ TÍN HIỆU VÀ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP KHẮC PHỤC

2.1. Phân tích hiện tượng rò tín hiệu trong hiệu chuẩn nội bộ

Cấu trúc một MĐTP tích hợp hệ con hiệu chuẩn nội bộ thời gian thực đã được trình bày trong các tài liệu [12], được thể hiện trên hình 2. Trong đó, các khối vẽ nét đứt như các phần tử chuyển mạch CM, mạch ghép định hướng, phần tử suy giảm SG được thêm vào so với các MĐTP thông thường để thực hiện quy trình hiệu chuẩn nội bộ. Các tín hiệu cao tần đầu vào RF, LO được cấp từ mạng phân phối tín hiệu tương ứng với các chế độ hoạt động của mô-đun. Đường hiệu chuẩn thu màu xanh lam, hiệu chuẩn phát màu đỏ, hiệu chuẩn ‘bypass’ màu xanh lá (Dùng để hiệu chuẩn đầu đo phát, xung nhịp lấy mẫu cho ADC). Như đã trình bày, bài báo này tập trung phân tích ở chế độ thu - hiệu chuẩn. Đường đi của THHC mong muốn (Màu hồng nét liền) và các tín hiệu rò (Màu hồng nét đứt) được thể hiện trên hình 2.

Như trên hình ta thấy có thể phân chia nhiễu rò thành hai nhóm. Nhóm thứ nhất là nhiễu rò tác động vào đầu ra đường thu cao tần trước khi vào bộ trộn, loại nhiễu rò này chủ yếu rò theo các chuyển mạch CM1-2, hiện tượng cảm ứng và phản xạ tín hiệu trong mô-đun. Nhóm thứ hai là nhiễu rò theo đường phát, sau đó, tín hiệu rò theo hai đường: theo đường hiệu chuẩn phát và theo đường tới ăng ten rồi phản xạ lại đường thu [4].



Hình 2. Cấu trúc TRM với đường đi THHC trong chế độ thu – hiệu chuẩn.

Với nhóm nhiễu rò thứ nhất, để đáp ứng yêu cầu cách ly cao, có thể có các giải pháp như: sử dụng các chuyển mạch có mức cách ly lớn (Hay mắc thêm các chuyển mạch nối tiếp) [4], tăng khoảng cách không gian giữa các linh kiện và làm vách ngăn giữa các đường tín hiệu trong mô-đun [10]. Với những mô-đun sử dụng trong mạng pha số có mật độ tích hợp cao, kích thước nhỏ thì để đáp ứng yêu cầu trên là rất khó khăn. Với nhóm nhiễu rò thứ hai, để đáp ứng yêu cầu cách ly cao, có thể có các giải pháp như: sử dụng thêm các bộ suy giảm có điều khiển tốc độ cao hay các chuyển mạch trên đường phát [4]. Điều này sẽ tăng chi phí và tính phức tạp trong thiết kế.

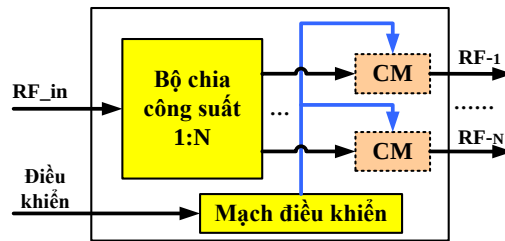
Như vậy, từ những phân tích trên cho thấy để đạt được yêu cầu cách ly cao trong hiệu chuẩn nội bộ, việc thiết kế cấu trúc MĐTP gặp nhiều khó khăn, tăng chi phí và thời gian thử nghiệm. Trong tài liệu [7] đã thử nghiệm khả năng cách ly đạt yêu cầu nêu trên, tuy nhiên việc thiết kế mô-đun rất phức tạp, kích thước mô-đun lớn (5.9 inch x 17 inch [10]). Phần tiếp theo sẽ trình bày

giải pháp để khắc phục hạn chế trên.

2.2. Đề xuất giải pháp khắc phục hiện tượng nhiễu

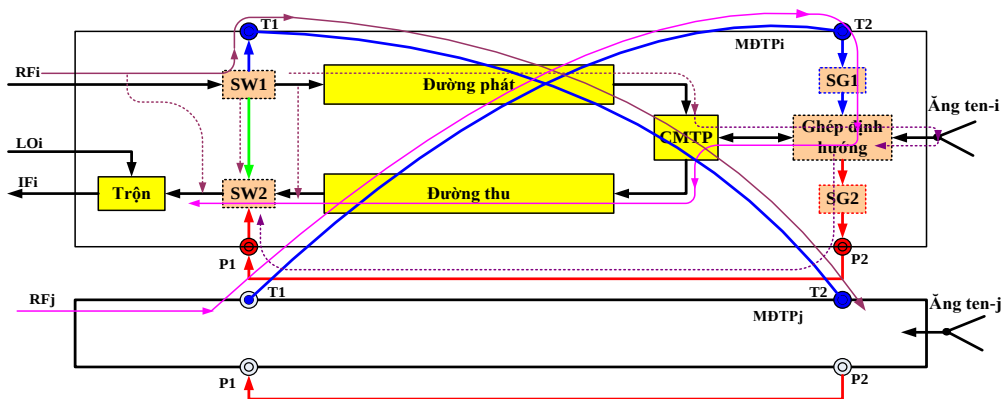
Trong bài báo [12] chúng tôi đã đề xuất giải pháp hiệu chuẩn nội bộ kênh thu, với THHC là tín hiệu được điều chế pha theo mã dịch pha nhị phân BPSK (Binary Phase Shift Keying) kết hợp với điều chế biên độ theo mã dịch biên nhị phân kiểu khóa On/Off OOK (On/Off Keying). Để giảm ảnh hưởng của nhiễu, chúng tôi đề xuất giải pháp tạo và phân phối THHC như sau:

1) Thứ nhất là tạo tập THHC cho các kênh thu có mã điều biên OOK khác nhau. Giải pháp này được thực hiện bằng cách trên mỗi đường THHC của mạng phân phối tín hiệu thêm một phần tử chuyển mạch CM, sau đó điều khiển các chuyển mạch này bằng chuỗi xung On/Off ngẫu nhiên khác nhau nhưng có cùng chu kỳ làm việc (gọi là hệ số điều biên) D (Duty cycle). Việc thêm các chuyển mạch không gây nhiều phức tạp và chi phí thiết kế phần cứng. Với giải pháp này, cấu trúc mạng phân phối tín hiệu thể hiện trên hình 3, với RF-in là tín hiệu điều pha theo mã BPSK được hình thành từ bộ tạo tín hiệu.



Hình 3. Mạng phân phối tín hiệu RF.

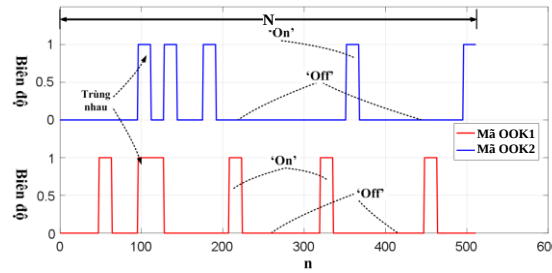
2) Thứ hai là cách thức phân phối THHC cho các MĐTP. Đó là kết nối THHC sẽ được thực hiện bằng việc ghép cặp hai MĐTP_{i,j} với nhau. Với đường hiệu chuẩn thu, hai đầu nối đường cấp T1-T2 không cùng nằm trên một mô-đun như hình 2 mà nó nằm trên hai mô-đun khác nhau. Việc thay đổi kết nối này thể hiện trên hình 4.



Hình 4. Cách kết nối ghép cặp hai MĐTP trong hiệu chuẩn thu.

Trên hình 4, việc kết nối đường hiệu chuẩn thu được mô tả như sau: THHC ở đầu vào RFi của MĐTPi có màu nâu, vào MĐTPj có màu hồng. Xét MĐTPi, THHC mong muốn đưa vào đường thu qua đầu nối T2 được cấp từ đầu nối T1 của MĐTPj. Như đã phân tích ở trên, nhiễu từ tín hiệu đầu vào RFi của MĐTPi có màu nâu nét đứt tác động vào đường thu, còn THHC trên đường thu là màu hồng. Như vậy, với giải pháp kết nối này, nhiễu và THHC khác nhau, điều này làm suy giảm hệ số tương quan giữa chúng. Hệ số tương quan được tính toán như sau :

Xét hai chuỗi tín hiệu khác mã điều biên OOK: $S_{OOK1}(n)$ và $S_{OOK2}(n)$, có cùng hệ số điều biên D , hai mã OOK được minh họa như trên hình 5.



Hình 5. Minh họa hai tín hiệu có mã OOK khác nhau.

Theo [9], hệ số tương quan hai chuỗi tín hiệu $S_{OOK1}(n)$ và $S_{OOK2}(n)$ được tính toán như sau:

$$r_{S_{OOK1}S_{OOK2}} = \frac{\sum_{n=1}^N (S_{OOK1}(n) - \overline{S_{OOK1}})(S_{OOK2}(n) - \overline{S_{OOK2}})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (S_{OOK1}(n) - \overline{S_{OOK1}})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (S_{OOK2}(n) - \overline{S_{OOK2}})^2}} \quad (2)$$

Hai chuỗi tín hiệu $S_{OOK1}(n)$ và $S_{OOK2}(n)$ được điều chế mã BPSK ngẫu nhiên, vậy:

$$\overline{S_{OOK1}} \approx 0, \overline{S_{OOK2}} \approx 0 \quad (3)$$

Thay (3) vào (2) ta có:

$$r_{S_{OOK1}S_{OOK2}} \approx \frac{\sum_{n=1}^N (S_{OOK1}(n)S_{OOK2}(n))}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (S_{OOK1}(n))^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (S_{OOK2}(n))^2}} \quad (4)$$

Gọi N là độ dài các chuỗi mã OOK, gọi M là tổng số mẫu xuất hiện mức 'On', vậy ta có:

$$D = M / N \quad (5)$$

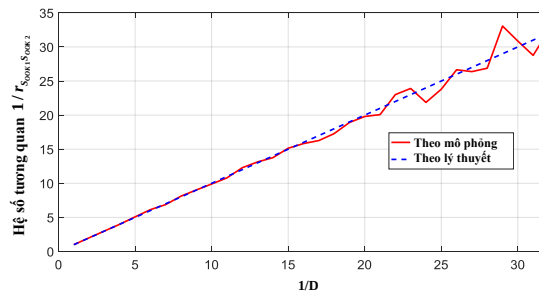
D cũng chính là xác suất xuất hiện của mức 'On' trên mỗi chuỗi mã OOK, theo lý thuyết xác suất thống kê khi hai mã OOK gieo ngẫu nhiên thì xác suất để chúng trùng nhau bằng D^2 . Vậy biểu thức (4) được biến đổi như sau:

$$r_{S_{OOK1}S_{OOK2}} \approx \frac{N \cdot D^2}{\sqrt{M} \sqrt{M}} = \frac{N \cdot (M / N)^2}{M} = \frac{M}{N} = D \quad (6)$$

Như vậy, áp dụng vào đề xuất trên, ta có hệ số tương quan giữa nhiễu rờ và THHC khá nhỏ ($D \ll 1$). Điều này sẽ làm giảm sai số hiệu chuẩn, cũng như giảm yêu cầu về cách ly cao giữa các đường tín hiệu trong mô-đun. Phần tiếp theo sẽ mô phỏng để chứng minh biểu thức (6) và đánh giá hiệu quả của đề xuất trên.

3. KIỂM CHỨNG QUA MÔ PHỎNG

3.1. Mô phỏng sự ảnh hưởng lẫn nhau của hai mã OOK



Hình 6. Hệ số tương quan của hai tín hiệu có mã OOK khác nhau theo hệ số điều biên D .

Sự ảnh hưởng lẫn nhau của hai tín hiệu được thể hiện qua hệ số tương quan. Việc tính toán hệ số tương quan của hai tín hiệu có mã điều biên OOK khác nhau được mô phỏng theo biểu thức (2) như sau: Tạo hai chuỗi tín hiệu có mã OOK khác nhau, với lần lượt chọn các giá trị $1/D = 1/32$, với mỗi giá trị của D tính $r_{S_{OOK1}S_{OOK2}}$ theo biểu thức (2). Kết quả mô phỏng được thể hiện trên hình 6 cho thấy, biểu thức (6) ước lượng theo lý thuyết là tương đối chính xác.

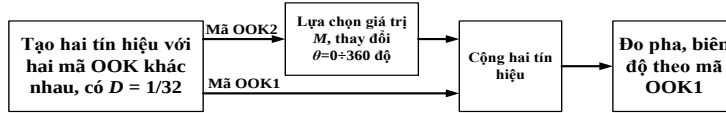
3.2. Mô phỏng đánh giá sai số hiệu chuẩn

Với giải pháp trước đây, biểu thức toán học (1) biểu diễn tín hiệu trên đường hiệu chuẩn, với sai số pha và biên độ thể hiện trên hình 1. Với giải pháp đề xuất, biểu thức toán học của tín hiệu trên đường hiệu chuẩn được biểu diễn như sau:

$$S_{nh}(n) = S_{OOK1}(n) + Me^{j\theta} S_{OOK2}(n) \quad (7)$$

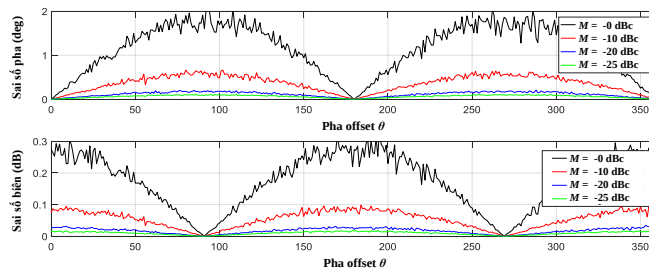
trong đó, $S_{OOK1}(n)$ là chuỗi THHC với mã điều biên OOK1 trên đường hiệu chuẩn mong muốn, $S_{OOK2}(n)$ là nhiễu rò với mã điều biên OOK2, M và θ là tham số đã được giải thích ở trên.

Đánh giá sai số do nhiễu rò gây ra được thực hiện trên Matlab với mô hình mô phỏng như trên hình 7. Trong mô phỏng này, chúng tôi chọn hệ số điều biên $D = 1/32$ (Chọn giá trị này như đã phân tích trong [12]). Nhiễu rò OOK2 nhận các mức cách ly $M = 0, -10, -20, -35$ dBc, mỗi giá trị của M thực hiện xoay pha offset $\theta = 0^\circ \div 360^\circ$. Cuối cùng là đo pha và biên độ theo mã OOK1, bằng cách xử lý tương quan giữa tín hiệu OOK1 trước và sau khi có nhiễu rò OOK2.



Hình 7. Sơ đồ kiểm chứng sai số do nhiễu rò gây ra.

Kết quả đo pha và biên độ theo tín hiệu OOK1 thể hiện trên hình 8. So sánh kết quả với hình 1 khi hiệu chuẩn yêu cầu độ chính xác cao, ta cần phải đảm bảo mức cách ly lớn hơn 55 dBc [4], cho thấy, với giải pháp đề xuất ở các mức cách ly $M = 0, -10, -20, -35$ dBc tương đương với giải pháp [4] ở các mức cách ly $M = -30, -40, -50, -55$ dBc. Vậy với giải pháp đề xuất ta giảm được yêu cầu cách ly cao trong hiệu chuẩn nội bộ khoảng 30 dBc ($\approx 20\lg(1/D)$ dBc), từ yêu cầu cách ly -55 dBc giảm xuống còn -25 dBc.



Hình 8. Sai số pha và biên độ theo giải pháp đề xuất với $D = 1/32$.

4. KẾT LUẬN

Qua kết quả mô phỏng cho thấy, hệ số tương quan giữa nhiễu rò và THHC rất nhỏ ($\approx D$), từ đó làm giảm sai số hiệu chuẩn và giảm mức yêu cầu cách ly cao giữa các tín hiệu trong hiệu chuẩn nội bộ. Kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng, khi các mã OOK khác nhau thì mức cách ly yêu cầu trong hiệu chuẩn nội bộ giảm tương đương với hệ số tương quan $r_{S_{OOK1}S_{OOK2}}$ ($\approx 20\lg(1/D)$ dBc). Điều này cho phép giảm khó khăn trong thiết kế cấu trúc mô-đun. Với hiệu quả và cách thức thực hiện đơn giản, việc áp dụng đề xuất vào thực tế là hoàn toàn khả thi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. H. Talisa, K. W. O'Haver, Comberiate, M. D. Sharp and Somerlock, "Benefits of Digital Phased Array Radars," Proceedings of the IEEE, **Vol. 104**, No. 6 (2016), pp. 530-543.
- [2]. İlgin Seker, "Calibration methods for phased array radars," Proc. SPIE 8714, Radar Sensor Technology XVII, Maryland (2013), pp. 1-16.
- [3]. D. Kim, S. Park, T. Kim, L. Minz and S. Park, "Fully Digital Beamforming Receiver With a Real-Time Calibration for 5G Mobile Communication," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **Vol. 67**, No. 6 (2019), pp. 3809-3819.
- [4]. S. J. Horst et al., "Implementation of RF circuitry for real-time digital beam-forming SAR calibration schemes," IET International Conference on Radar Systems, Glas (2012), pp. 1-6.
- [5]. J. P. Hoffman et al., "Advances in digital calibration techniques enabling real-time beamforming SweepSAR architectures," IEEE Aerospace Conference, USA (2013), pp. 1-9.
- [6]. J. P. Hoffman et al., "Digital calibration of TR modules for real-time digital beamforming SweepSAR architectures," IEEE Aerospace Conference, USA (2012), pp. 1-8.
- [7]. J. P. Hoffman et al., "Digital calibration system enabling real-time on-orbit beamforming," IEEE Aerospace Conference, USA (2014), pp. 1-11.
- [8]. C. Fulton et al., "Digital Phased Arrays: Challenges and Opportunities," Proceedings of the IEEE, **Vol. 104**, No. 3 (2016), pp. 487-503.
- [9]. <https://rpubs.com/nguyenngocbinhneu/432206>, truy cập ngày 05 tháng 9 năm 2021.
- [10]. T. Thrivikraman et al., "A compact two-stage 120W GaN high power amplifier for SweepSAR radar systems," IEEE Aerospace Conference, USA (2014), pp. 1-10.
- [11]. M. Longbrake et al., "Digital beamforming using highly integrated receiver-on-chip modules," IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, USA (2010), pp. 196-201.
- [12]. Hung Tran Viet, Thien Hoang Minh, "A real-time internal calibration method for radar systems using digital phased array antennas," 7th EAI International Conference (INISCOM 2021), Hanoi (2021), pp. 88-103.

ABSTRACT

SOLUTIONS TO REDUCE THE CORROLATION BETWEEN LEAKAGE SIGNAL WITH CALIBRATION SIGNAL IN THE INTERNAL CALIBRATION OF THE DIGITAL PHASED ARRAY ANTENNA SYSTEM

Real-time internal calibration method for digital phased array antenna system is being studied and widely applied. But this method also has signal leakage in the module which causes large errors in calibration and is a big challenge when calibration with high accuracy is required. The article proposes a solution to create and distribute the calibration signal (CalSig) for channels in receiver calibration in order to reduce the correlation between the leakage signal and CalSig, and increase the accuracy in calibration. By generating a different set of CalSigs and pairing the two modules into a pair in the receive calibration, the CalSig from one module will be extracted to the other. This solution overcomes the requirement for high isolation between leakage signal and CalSig. The effectiveness of the proposal is proven through simulation, the results show that the proposal is highly effective.

Keywords: Phased array antenna calibration; Internal calibration; Calibration signal; Isolation in internal calibration.

Nhận bài ngày 12 tháng 8 năm 2021

Hoàn thiện ngày 06 tháng 9 năm 2021

Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 10 năm 2021

Địa chỉ: Học viện Kỹ thuật quân sự - 236 Hoàng Quốc Việt.

**Email:* hung.isi@lqdtu.edu.vn.com.