

315-MHZ, OOK TRANSMITTER USING A RING OSCILLATOR WITH AN EDGE COMBINING FREQUENCY MULTIPLIER ON 0.18 μm CMOS TECHNOLOGY

Hoang Minh Thien*, Tran Viet Hung

Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 16/5/2021 Revised: 22/6/2021 Published: 22/6/2021	This paper presents design of a transmitter operating in 315 MHz frequency with OOK modulation for short-range wireless sensor networks. In this design, a ring oscillator is used to generate low frequency oscillation, which is multiplied using an edge combiner up to carrier frequency. The output power is guaranteed by an inverter based class-D power amplifier. The main components are designed using MOS active elements, the frequency of the oscillator is low, reducing chip area and power consumption. The transmitter is fabricated on 0.18 μm CMOS technology, it achieves -8.7 dBm output power, consumes 1.7 mW with 0.075 mm² chip area.
KEYWORDS CMOS transmitter OOK modulation Ring oscillator Wireless sensor network Class-D power amplifier	

BỘ PHÁT RF OOK 315MHZ SỬ DỤNG DAO ĐỘNG MẠCH VÒNG VỚI BỘ NHÂN TẦN SỐ TỔ HỢP SƯỜN XUNG TRÊN CÔNG NGHỆ CMOS 0,18 μm

Hoàng Minh Thiện*, Trần Việt Hùng

Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 16/5/2021 Ngày hoàn thiện: 22/6/2021 Ngày đăng: 22/6/2021	Bài báo trình bày thiết kế bộ phát tín hiệu RF hoạt động ở tần số 315 MHz điều chế OOK cho các mạng cảm biến không dây cự ly gần. Trong thiết kế này, một bộ dao động mạch vòng (ring oscillator) được dùng để tạo tín hiệu tần số thấp, sau đó nhân tần lên đến tần số sóng mang 315 MHz bằng bộ nhân tần số tổ hợp sườn xung. Công suất đầu ra được đảm bảo bởi bộ khuếch đại công suất lớp-D dựa trên các cổng đảo. Các thành phần chính đều được thiết kế sử dụng các phần tử tích cực, tần số bộ dao động thấp, do đó, tiết kiệm được diện tích chip và công suất tiêu thụ. Bộ phát RF được chế tạo trên công nghệ CMOS 0,18 μm, công suất ra đạt -8,7 dBm, tiêu thụ 1,7 mW trong khi chỉ chiếm diện tích 0,075 mm².
TỪ KHÓA Bộ phát RF CMOS Điều chế OOK Dao động mạch vòng Mạng cảm biến không dây Khuếch đại công suất lớp D	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4499>

* Corresponding author. Email: thienhm.isi@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong thập kỷ qua, mạng cảm biến không dây ngày càng phát triển và được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực của đời sống như công nghiệp, nông nghiệp, y tế, giao thông... [1]. Trên mỗi nút cảm biến, bộ thu/phát RF là một trong những thành phần quan trọng nhất, thực hiện việc truyền/nhận dữ liệu không dây giữa các nút cảm biến với nhau và với trung tâm điều khiển [2]. Đối với mạng truyền dữ liệu không dây ở cự ly ngắn như mạng WBAN, mạng trong phương tiện giao thông hoặc trong các tòa nhà, dải tần số 315 MHz và 402-405 MHz được ưu tiên sử dụng so với các tần số cao hơn do dễ dàng truyền qua chướng ngại vật (vì bước sóng dài), giảm công suất tiêu thụ.

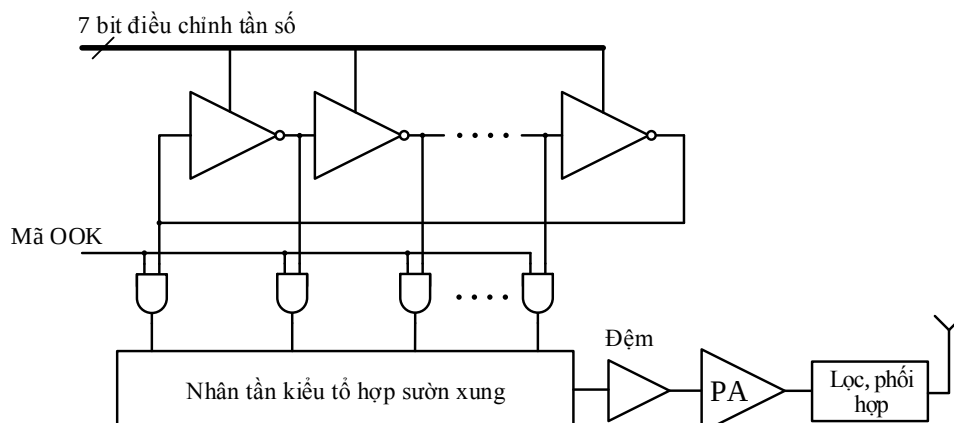
Bộ thu và bộ phát RF thường được thiết kế cùng nhau, tuy nhiên trong bài báo này, chúng tôi chỉ tập trung vào bộ phát RF ở tần số 315 MHz kiểu điều chế OOK trên công nghệ CMOS. Hiện đã có nhiều công bố về các thiết kế bộ phát tín hiệu RF trên công nghệ CMOS dùng cho mạng cảm biến không dây [3]-[6]. Trong các bài báo này, bộ phát RF với kiểu điều chế OOK hoặc FSK được thiết kế cho mạng WBAN trong y tế và các ứng dụng khác. Có thể thấy, các bộ phát RF này đều có hai thành phần quan trọng nhất là: bộ tạo dao động sóng mang và bộ khuếch đại công suất. Thông thường, để tạo dao động sóng mang, người ta dùng PLL-VCO. VCO thường là bộ dao động LC, ưu điểm của bộ dao động LC là có tần số cao, dải điều chỉnh rộng. Tuy nhiên, trên công nghệ mạch tích hợp CMOS, cuộn cảm L và tụ điện C thường yêu cầu lớp kim loại đặc biệt và chiếm diện tích chip lớn hơn rất nhiều so với các thành phần mạch tích cực khác [7]. Ngoài ra, để ổn định tần số, PLL được thiết kế kèm với VCO, làm cho hệ thống phức tạp, tiêu thụ công suất lớn và cần một dao động chuẩn đưa từ ngoài vào làm tham chiếu. Một giải pháp khác để tạo dao động sóng mang là nhân tần số từ dao động chuẩn có tần số thấp. Tuy nhiên, các bộ nhân truyền thống có độ suy giảm tín hiệu lớn, hệ số nhân càng cao thì độ suy giảm càng lớn. Để đảm bảo mức tín hiệu, cần phải có các bộ khuếch đại đệm đi kèm, làm tăng công suất tiêu thụ [8].

Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng bộ dao động mạch vòng (Ring Osc) để tạo dao động. Nhược điểm của Ring Osc là tần số dao động thấp và thay đổi nhiều theo sai số công nghệ chế tạo, nhiệt độ và điện áp cấp [7]. Tuy nhiên ưu điểm của Ring Osc là có thể được thiết kế với chỉ các thành phần tích cực transistor PMOS và NMOS, khiến cho diện tích chip nhỏ hơn rất nhiều so với dao động LC và không yêu cầu lớp kim loại đặc biệt nào. Để khắc phục nhược điểm tần số dao động thấp, chúng tôi thiết kế Ring Osc ở tần số thấp, sau đó dùng bộ nhân tần kiểu tổ hợp sườn xung để nhân tần số lên giá trị mong muốn. Do đầu ra Ring Osc có kiểu logic số, nên bộ nhân tần tổ hợp sườn xung đơn thuần là mạch logic tổ hợp, không làm suy giảm tín hiệu như bộ nhân truyền thống và chiếm diện tích không đáng kể. Việc tần số đầu ra Ring Osc thay đổi theo công nghệ được khắc phục bằng cách điều chỉnh tần số sau chế tạo nhờ mạch điều chỉnh tần số. Ngoài ra, do kiểu điều chế là OOK nên những thay đổi tần số nhỏ theo nhiệt độ và nguồn cấp sẽ không ảnh hưởng nhiều đến chất lượng của dữ liệu truyền đi.

Bài báo gồm có năm phần, phần tiếp theo sẽ trình bày cấu trúc của bộ phát RF, thiết kế nguyên lý chi tiết các thành phần chính được trình bày trong phần 3, phần 4 là kết quả đo và cuối cùng là kết luận.

2. Cấu trúc bộ phát RF

Hình 1 thể hiện sơ đồ cấu trúc của bộ phát RF. Thành phần chính bao gồm bộ dao động Ring Osc bảy công đảo mắc nối tiếp, bộ nhân tần số và khuếch đại công suất đầu ra. Ring Osc là bộ tự dao động, được thiết kế để có tần số đầu ra xung quanh 45 MHz, tần số này có thể điều chỉnh được bằng các bit điều chỉnh tần số. Bảy đầu ra của các công đảo được trích ra và đưa vào bộ nhân 7 tần số. Bộ nhân tần số làm việc theo nguyên tắc tổ hợp sườn xung (edge combining frequency multiplier), tạo ra tín hiệu có tần số 315 MHz. Tín hiệu này sau đó được khuếch đại bởi bộ khuếch đại công suất lớp D trước khi đi vào ăng ten và bức xạ ra không gian.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc thiết bị phát RF

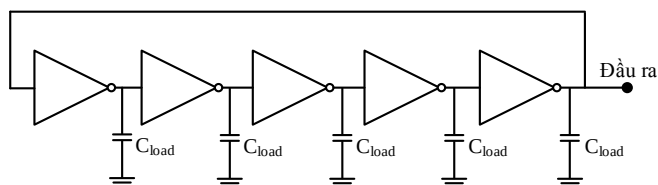
3. Thiết kế mạch

3.1. Bộ dao động Ring Osc

Ring Osc CMOS bao gồm một số lẻ các cổng đảo mắc nối tiếp với nhau như Hình 2, trong đó, đầu ra của cổng đảo cuối cùng được mắc nối tiếp về đầu vào của cổng đầu tiên. Trên Hình 2, tụ C_{load} là tổng tụ ký sinh ở đầu ra của một cổng đảo và đầu vào của cổng tiếp theo. Tần số của bộ dao động này phụ thuộc vào độ trễ tín hiệu qua mỗi cổng và được tính theo công thức [9]:

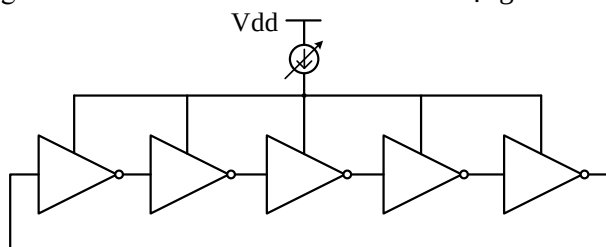
$$f_{ocs} = \frac{1}{N.t_d} = \frac{I_D}{\eta.N.C_{load}.V_{DD}} \quad (1)$$

trong đó N là số cổng đảo, I_D là dòng đi qua các transistor của cổng đảo, V_{DD} điện áp nguồn, η là hệ số tỉ lệ.



Hình 2. Nguyên lý bộ dao động Ring Osc

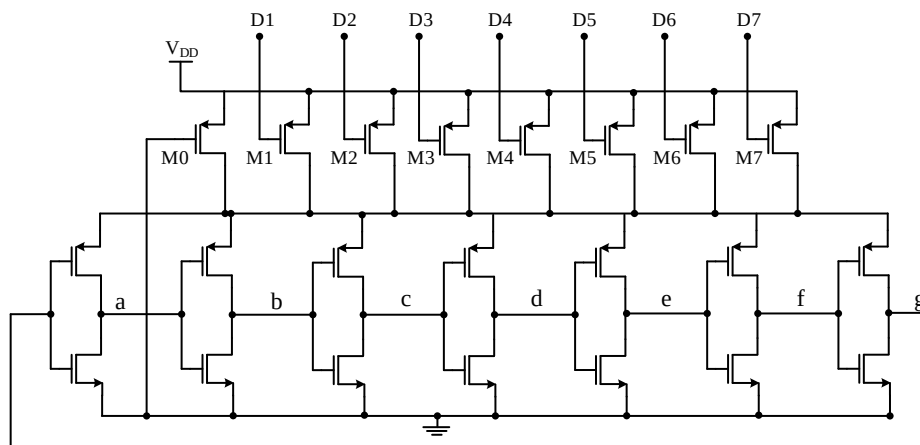
Tần số dao động của Ring Osc thường thay đổi theo độ ổn định của công nghệ chế tạo, tần số đo được có thể khác xa tần số mong muốn. Do vậy, khi thiết kế cần phải có các giải pháp điều chỉnh để sau khi chế tạo có thể đưa tần số về giá trị mong muốn. Công thức (1) cho thấy, để điều chỉnh tần số của bộ dao động, ta có thể điều chỉnh I_D , V_{DD} hoặc C_{load} . Trong thiết kế này, chúng tôi sử dụng nguồn dòng như Hình 3 để điều chỉnh tần số dao động.



Hình 3. Điều chỉnh tần số Ring Osc bằng nguồn dòng điều chỉnh được

Toàn bộ sơ đồ nguyên lý của bộ dao động Ring Osc được thể hiện trên Hình 4. Tần số thiết kế là 45 MHz. Tần số được điều chỉnh nhảy bước với 7 bit logic số. Các PMOS M1-M7 có kích

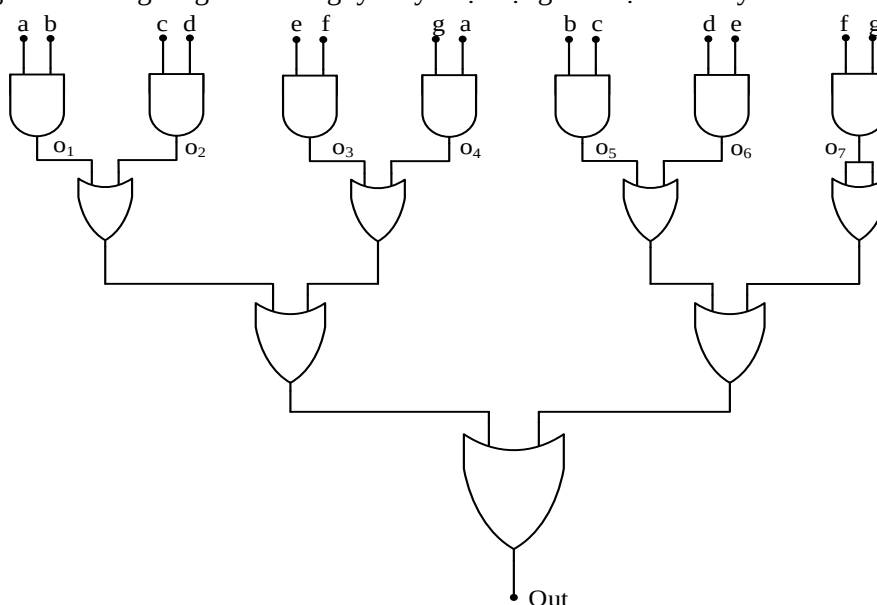
thước giống nhau, chúng sẽ làm việc khi các bit D1-D7 tương ứng ở mức THẤP, ngược lại chúng sẽ bị ngắt, nhờ đó dòng cấp cho các cổng đảo của Ring Osc được điều chỉnh, dẫn tới tần số dao động thay đổi theo.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý của Ring Osc

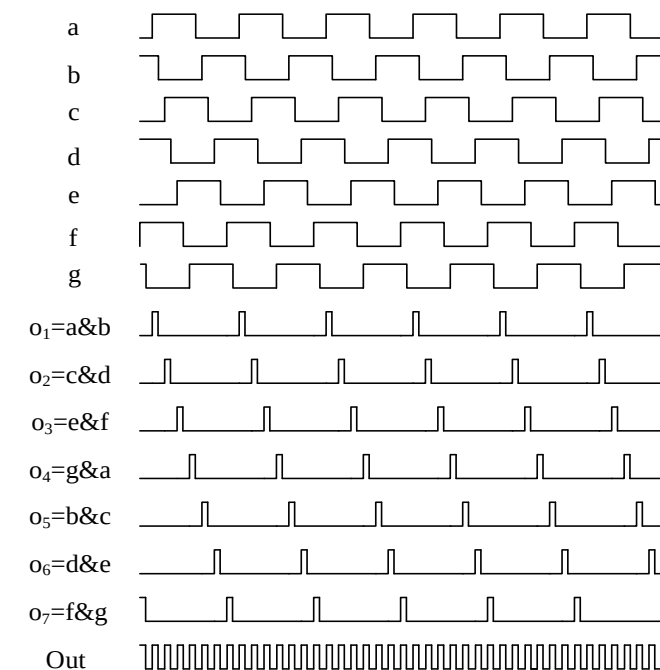
3.2. Bộ nhân tần kiểu tổ hợp sườn xung

Bộ nhân tần số bằng phương pháp tổ hợp sườn xung được sử dụng để nhân 7 tần số dao động của Ring Osc. Đầu ra các cổng đảo của Ring Osc có cùng tần số và lệch pha nhau $360/N$ độ (N là số cổng đảo). Bộ tổ hợp sườn xung sẽ lấy các pha này và tổ hợp lại với nhau để tạo ra tần số cao hơn N lần so với tần số của mỗi pha. Sơ đồ nguyên lý của bộ nhân tần được thể hiện trên Hình 5. Hình 6 là giản đồ thời gian giải thích nguyên lý hoạt động của bộ nhân này.

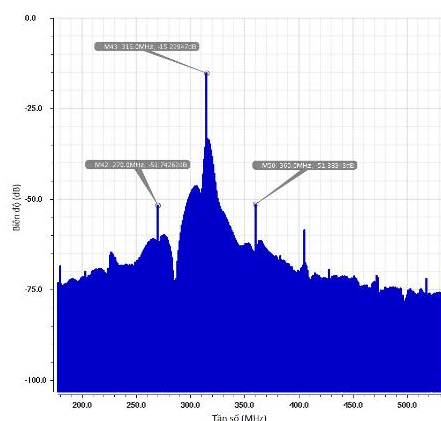


Hình 5. Sơ đồ nguyên lý mạch nhân tần tổ hợp sườn xung

Hình 7 là kết quả mô phỏng phổ tần số đầu ra bộ nhân tần số. Có thể nhận thấy, do tổ hợp từ các xung có độ dốc khá lớn nên phổ đầu ra tồn tại nhiều thành phần hài bậc cao với tần số bộ của 45 MHz. Hệ số hài lớn nhất là -36 dBc so với đỉnh, cách đỉnh tối thiểu là 45 MHz, do vậy, chúng có thể dễ dàng bị loại bỏ nhờ sử dụng các bộ lọc thích hợp ở đầu ra.



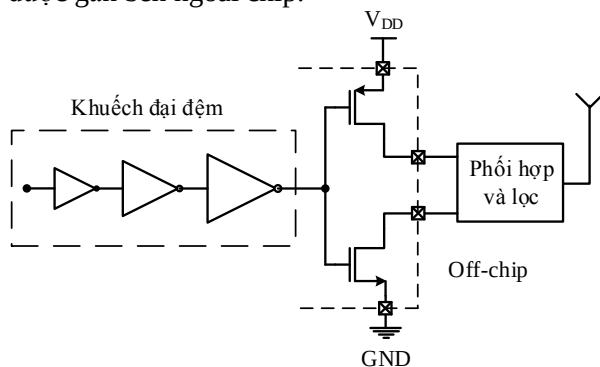
Hình 6. Giảm đồ thời gian của bộ nhân tần tổ hợp sườn xung



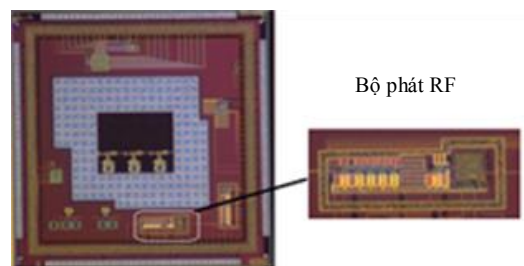
Hình 7. Phổ tần số đầu ra bộ nhân (mô phỏng)

3.3. Bộ khuếch đại công suất lớp D dựa trên cổng đảo

Tín hiệu trước khi đưa vào ăng ten để phát xạ ra không gian được cho qua bộ khuếch đại công suất để đảm bảo đủ công suất đầu ra yêu cầu. Sơ đồ nguyên lý của bộ khuếch đại công suất được thể hiện trên Hình 8, đây là bộ khuếch đại công suất lớp D dựa trên cổng đảo CMOS (CMOS Inverter based class-D power amplifier). Các transistor thực hiện chức năng khuếch đại công suất được thiết kế với độ rộng kênh dẫn lớn hơn rất nhiều so với transistor trong các cổng logic thông thường. Phía trước là các bộ khuếch đại đệm (driving amplifier). Kết nối giữa bộ khuếch đại công suất và ăng ten là mạng phối hợp trở kháng và lọc thông dải, chúng là các thành phần rời rạc và được gắn bên ngoài chip.



Hình 8. Bộ khuếch đại công suất lớp D dựa trên cổng đảo CMOS

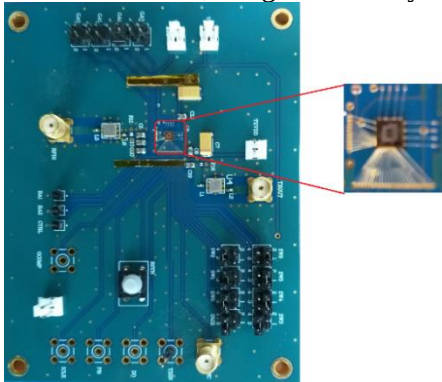


Hình 9. Ảnh chụp sau chế tạo

Bộ phát RF được thiết kế, chế tạo trên công nghệ CMOS 0,18 μm , Hình 9 là ảnh chụp chụp bán dẫn sau chế tạo, trong đó bộ phát RF có kích thước 0,42x0,18 mm, chiếm diện tích 0,075 mm^2 .

4. Kết quả đo

Bộ phát RF sau chế tạo được hàn lắp trên bo mạch cùng với các phần tử rời rạc để kiểm tra, thử nghiệm. Hình 10 là bo mạch kiểm tra, chip thử là chip không đóng vỏ, các chân vào/ra được nối ra PAD trên bo mạch ngoài nhờ máy wire-bonding.



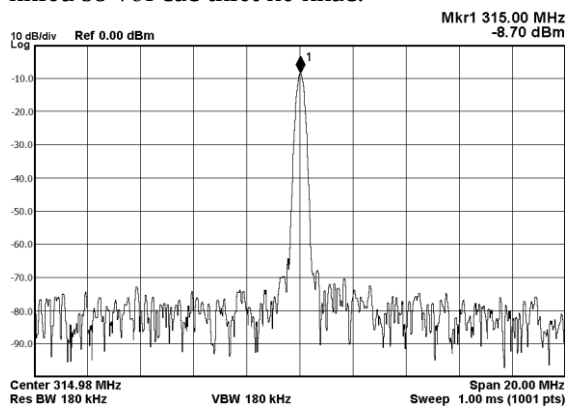
Hình 10. Bo mạch gắn chip thử



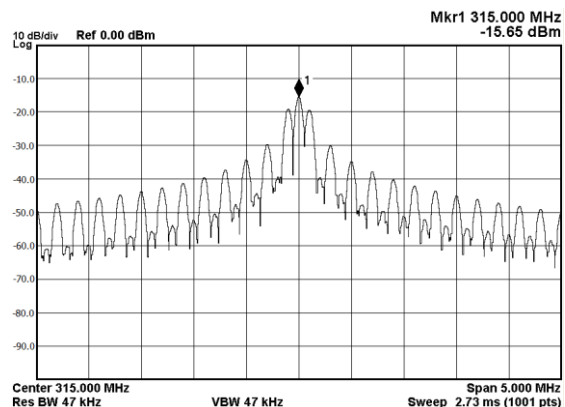
Hình 11. Tần số đầu ra

Hình 11 là tần số đầu ra với các mã điều chỉnh tần số bộ dao động Ring Osc khác nhau. Mã số i tương ứng với dãy D1-D7 có i bit ở mức THẤP.

Hình 12 là kết quả đo phổ đầu ra khi phát liên tục, Hình 13 là phổ tín hiệu khi phát với dữ liệu có tốc độ 200 kbps. Có thể thấy, bộ phát RF được thiết kế chế tạo có thể đạt công suất phát -8,70 dBm trên tải 50Ω, tốc độ dữ liệu có thể lên tới tối thiểu là 200 kbps. Với nguồn V_{DD} 1,8V, bộ phát RF tiêu thụ dòng 0,96 mA, tương ứng với công suất 1,74 mW. Bảng 1 tóm tắt các thông số của bộ phát RF được thiết kế có so sánh với một số công trình đã công bố trước đây. Có thể thấy, trên cùng nền công nghệ, bộ phát RF được thiết kế có công suất tiêu thụ nhỏ với diện tích bé hơn nhiều so với các thiết kế khác.



Hình 12. Phổ đầu ra khi phát liên tục



Hình 13. Phổ đầu ra khi phát có dữ liệu 200kbps

Bảng 1. Tóm tắt tham số và so sánh

Tham số	Tài liệu [10]	Tài liệu [8]	Tài liệu[11]	Trong bài báo này
Công nghệ CMOS (nm)	180	55	65	180
Nguồn (V)	1,8	0,9	1	1,8
Tần số (MHz)	900	900	400-500	315
Tốc độ dữ liệu (kbps)	-	100	-	200
Công suất ra (dBm)	-14,5	5,5	11	-8,7
Công suất tiêu thụ (mW)	20,7	11,1	5	1,74
Diện tích (mm ²)	3,0	1,6	2,04	0,075

5. Kết luận

Bộ phát tín hiệu RF là một thành phần quan trọng của mạng cảm biến không dây. Để nâng cao khả năng tích hợp trên chip bán dẫn và tiết kiệm năng lượng, bộ phát RF đã được thiết kế sử dụng hoàn toàn các phần tử tích cực, từ bộ tạo dao động, bộ nhân tần tới bộ khuếch đại công suất đầu ra. Bộ phát RF sau khi chế tạo được hàn lắp lên bo mạch ngoài để đo kiểm. Kết quả cho thấy bộ phát RF được thiết kế có công suất đầu ra -8,7 dBm, đảm bảo đáp ứng được cho truyền thông cự ly gần, với diện tích chip chỉ 0,075mm².

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247-1256, Aug. 2003.
- [2] H. Karl and A. Willig, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley & Sons, West Sussex, England, 2005.
- [3] M. Vidojkovic, X. Huang, P. Harpe, S. Rampu, C. Zhou, L. Huang, K. Imamura, B. Busze, F. Bouwens, M. Konijnenburg, J. Santana, A. Breeschoten, J. Huisken, G. Dolmans, and H. Groot, "A 2.4GHz ULP OOK single-chip transceiver for healthcare applications," *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, 2011, pp. 458-459.
- [4] Y-H. Liu, X. Huang, M. Vidojkovic, A. Ba, P. Harpe, G. Dolmans, and H. Groot, "A 1.9nJ/b 2.4GHz multistandard (bluetooth low energy/zigbee/ieee802.15.6) transceiver for personal-body-area networks," *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC)*, 2013, pp. 446-448.
- [5] K. Abdelhalim, L. Kokarovtseva, J. L. P. Velazquez, and R. Genov, "915-MHz FSK/OOK Wireless Neural Recording SoC With 64 Mixed-Signal FIR Filters," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 10, pp. 2478-2493, Oct. 2013.
- [6] T. Azadmousavi, E. N. Aghdam, and J. Frounchi, "A Power-Efficient Configurable FSK-OOK Transmitter with Scalable Data Rate for Wireless Medical Applications," *Circuits Syst Signal Process*, vol. 39, pp. 2776-2795, 2020.
- [7] T. Miyazaki, M. Hashimoto, and H. Onodera, "A Performance Comparison of PLLs for Clock Generation Using Ring Oscillator VCO and LC Oscillator in a Digital CMOS Process," *ASPDAC*, Jan. 2004, pp. 27-30.
- [8] K. Choi et al., "A 5.5-dBm, 31.9% Efficiency 915-MHz Transmitter Employing Frequency Tripler and 207uW Synthesizer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 1, pp. 90-93, Jan. 2020.
- [9] K. Sundaresan, P. E. Allen, and F. Ayazi, "Process and Temperature Compensation in a 7-MHz CMOS Clock Oscillator," *IEEE Journal Of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 2, pp. 433-442, Feb. 2006.
- [10] K. Liao, P. Huang, W. Chiu, and T. Lin, "A 400-MHz/900-MHz/2.4-GHz multi-band FSK transmitter in 0.18 μ m CMOS," *IEEE Asian Solid-State Circuits Conf.*, Nov. 2009, pp. 353-356.
- [11] F. Li, W. Liu, P. Xue and Z. Hong, "An All-Digital Reconfigurable RF Transmitter for Walkie-Talkie Applications based on 1-bit/3-bit Sigma-Delta Modulation," *2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, 2018, pp. 1-3.