PENINGKATAN AKURASI LOKALISASI TDOA DI PERKOTAAN: PENEMPATAN NODE DAN SINKRONISASI PRESISI TINGGI

Ignatius Ivan Prihadi[1], Mohamad Rafi Alpasha[1], Titon Dutono[1], Tri Budi Santoso[2], Rini Satiti[1], Inka Trisna Dewi[1], Paramita Eka Wahyu Lestari[1]

[1]Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia
[2]Departemen Teknologi Multimedia Kreatif, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111, Indonesia

E-mail: ivanprihadi26@gmail.com

Abstract

A comprehensive reliability study was conducted on an automated passive radar prototype using the Time Difference of Arrival (TDoA) method for spectrum monitoring and illegal FM transmitter localization in urban environments. The system utilizes three distributed RTL-SDR receivers synchronized through either GPS (Pulse Per Second) or Network Time Protocol (NTP) in Surabaya, Indonesia. Experimental results indicate that the geometric coverage factor dominates accuracy more significantly than the choice of syn-chronization method. Under two distinct coverage conditions, the system achieves average accuracies of 70% to 80% when the target is inside the sensor triangle, compared to less than 30% when the target is outside. Notably, NTP-based synchronization demonstrates comparable or superior performance to GPS in dense urban areas with multipath propagation, challenging conventional assumptions about GNSS superi-ority. Furthermore, full automation of the acquisition-processing pipeline achieved success rates exceeding 96% within coverage areas. These findings provide practical design guidance for cost-effective spectrum monitoring in emerging markets and validate NTP as a viable alternative for distributed passive radar de-ployments.

Keywords: *Passive Radar, Time Difference of Arrival, RTL-SDR, Time Synchronization, Geometric Cover-age*

Abstrak

Sebuah studi keandalan komprehensif dilakukan terhadap prototipe radar pasif otomatis yang menggu-nakan metode *Time Difference of Arrival* (TDoA) untuk pemantauan spektrum dan pelacakan lokasi pe-mancar FM ilegal di lingkungan perkotaan. Sistem ini memanfaatkan tiga penerima RTL-SDR terdistribusi yang disinkronkan melalui GPS (*Pulse Per Second*) atau *Network Time Protocol* (NTP) di Surabaya, In-donesia. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa faktor cakupan geometris lebih dominan memengaruhi akurasi dibandingkan pemilihan metode sinkronisasi. Pada dua kondisi cakupan yang berbeda, sistem men-capai akurasi rata-rata 70% hingga 80% ketika target berada di dalam segitiga sensor, dibandingkan kurang dari 30% ketika target berada di luar cakupan tersebut. Sinkronisasi berbasis NTP terbukti menunjukkan performa yang sebanding, bahkan lebih unggul dibandingkan GPS di area perkotaan padat dengan efek propagasi *multipath*, sehingga menantang asumsi konvensional mengenai keunggulan GNSS. Selain itu, otomatisasi penuh pada alur akuisisi dan pemrosesan data berhasil mencapai tingkat keberhasilan lebih dari 96% di dalam area cakupan sensor. Temuan ini memberikan panduan desain praktis untuk pemantauan spektrum yang hemat biaya di negara berkembang, sekaligus memvalidasi NTP sebagai alternatif yang layak untuk penerapan radar pasif terdistribusi.

Kata Kunci: Radar Pasif, Time Difference of Arrival, RTL-SDR, Sinkronisasi Waktu, Cakupan Geometris

PENDAHULUAN

Pengelolaan spektrum merupakan bagian krusial dalam infrastruktur telekomu-nikasi modern. Meskipun regulasi pita spektrum telah ditetapkan, keberadaan pemancar FM ilegal masih marak terjadi di kota-kota besar seperti Surabaya (ITU 2011). Siaran tidak resmi ini menyebabkan interferensi pada frekuensi komersial maupun layanan daru-rat. Metode penertiban konvensional menggunakan *Direction Finding* secara manual saat ini dinilai kurang efisien dan memakan banyak waktu.

Sebagai solusi, *Time Difference of Arrival* (TDoA) hadir sebagai metode pela-cakan pasif yang menjanjikan (Zhou dkk. 2020). Ketersediaan *Software Defined Ra-dio* (SDR) berbiaya rendah seperti RTL-SDR memungkinkan implementasi jaringan sen-sor terdistribusi secara masif (Panoradio SDR 2017; Scholl 2019). Secara teori, TDoA mampu memberikan akurasi pelacakan yang tinggi (Schreiber & Bajer 2017). Namun, performa perangkat ini di lingkungan urban kerap terdegradasi oleh redaman sinyal ban-gunan dan efek propagasi jamak (*multipath*), yang memicu hilangnya kuncian sinyal GNSS (*loss of lock*) (Irsyad dkk. 2024).

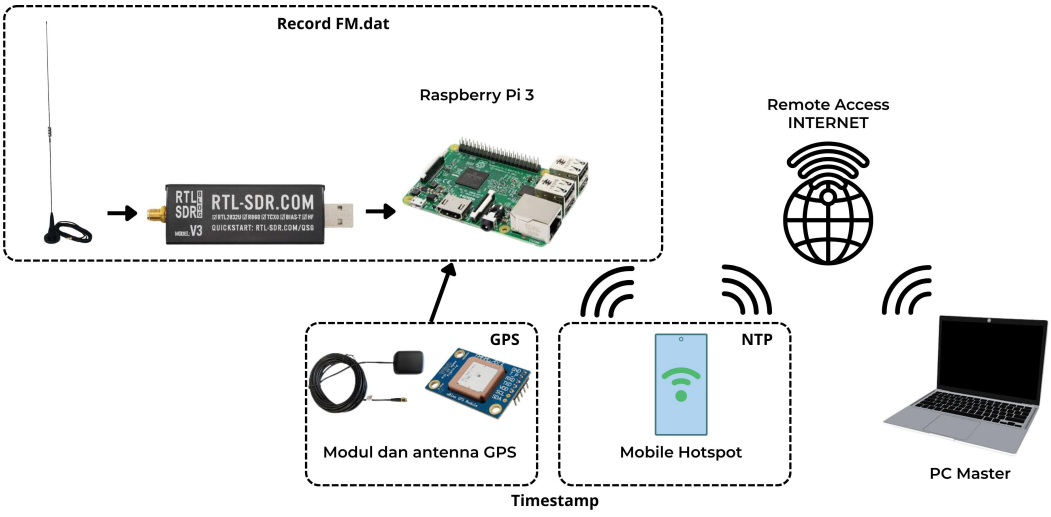
Penelitian terkait TDoA saat ini masih memiliki celah riset. Pertama, belum ada komparasi empiris langsung antara kinerja sinkronisasi GPS dan *Network Time Proto-col* (NTP) di lingkungan lapangan yang sama. Kedua, dominasi variabel letak geografis (geometri sensor terhadap target) dibandingkan variabel referensi waktu belum dikuan-tifikasi secara sistematis. Ketiga, sebagian besar prototipe masih membutuhkan intervensi manual. Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini memberikan kontribusi kebaruan melalui komparasi empiris langsung antara GPS dan NTP sekaligus mendemonstrasikan evaluasi sistem otomatis penuh (*end-to-end*) yang terbukti andal.

Untuk mengatasi kesenjangan tersebut, penelitian ini mengevaluasi keandalan prototipe radar pasif TDoA otomatis di Surabaya melalui pengujian komparatif GPS dan NTP pada skenario cakupan geografis dalam dan luar jaringan, dan membuktikan

secara kuantitatif bahwa geometri letak mendominasi akurasi pelacakan. Kajian ini juga mem-validasi kelayakan NTP sebagai alternatif GPS di wilayah padat bangunan, serta meng-hadirkan arsitektur perangkat lunak orkestrasi otomatis dengan rasio keberhasilan pengo-lahan lebih dari 96%. Seluruh pengujian dan pemantauan spektrum dilaksanakan sesuai regulasi dan perizinan frekuensi yang berlaku untuk mencegah interferensi terhadap sta-siun berlisensi.

METODE PENELITIAN

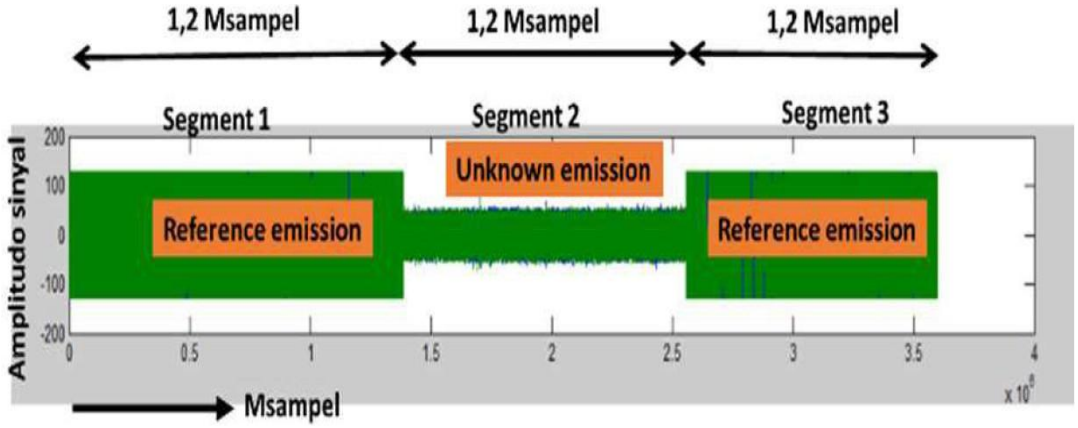
Konfigurasi Perangkat Keras. Jaringan radar pasif ini terdiri dari tiga sensor yang tersebar di Surabaya. Tiap *node* menggunakan Raspberry Pi 3B dan perangkat RTL-SDR V3 dengan antena VHF *omnidirectional* 2,5 dBi. Ketiga sensor terhubung ke PC Master melalui *Virtual Private Network* (VPN) ZeroTier untuk kebutuhan komputasi jarak jauh terpusat. Arsitektur sistem dan diagram pengkabelan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Sistem dan Diagram Pengkabelan

RTL-SDR dikonfigurasi untuk mengekstrak sampel *In-phase/Quadrature* (IQ) se-cara serempak dengan laju cuplik f_s = 1.2 MSample/s. Perekaman dilakukan dalam jen-dela waktu 3 detik yang dibagi menjadi tiga segmen berurutan: 1 detik untuk frekuensi referensi (100,0 MHz), 1 detik untuk frekuensi stasiun target, dan 1

detik kembali ke frekuensi referensi (Scholl 2019). Pola ini esensial untuk mengestimasi nilai *delay* sinyal target secara dinamis.



Gambar 2. Perekaman berurutan antara sinyal referensi dan sinyal emisi target dalam jendela sampel 3 detik.

Metode Sinkronisasi Waktu. Pengujian membandingkan dua arsitektur referensi waktu. Metode pertama adalah GPS *Pulse Per Second* (PPS) dengan presisi teoritis $\pm 2.1\ \mu$s. Kendala metode ini adalah kewajiban jangkauan *line-of-sight* ke satelit, di mana area perkotaan padat sering memicu efek pantulan dan hilangnya kuncian presisi. Metode ke-dua menggunakan kueri server *Network Time Protocol* (NTP) melalui modul 4G LTE. Meski memiliki latensi bawaan ~25 ms, jaringan seluler kebal terhadap redaman halan-gan fisik visual, sehingga secara hipotesis lebih andal di area urban (Srun dkk. 2023).

Estimasi TDoA dan Kalkulasi Geometris. Selisih keterlambatan gelombang (*delay*) antar-sensor yang disimbolkan dengan τ_{est} diestimasi menggunakan indeks pun-cak korelasi silang diskrit (Panoradio SDR 2019):

$$\tau_{est} = argmax \sum_{n=0}^{M-1} S_1(n) \cdot S_2(n+\tau) \quad (1)$$

Variabel S_1 dan S_2 adalah sampel sinyal di masing-masing sensor. Nilai waktu tunda (τ)

kemudian dikonversi menjadi jarak metrik absolut (*Difference of Arrival* / DoA):

$$DoA = \frac{\tau_{\text{est}} \times c}{f_s} \tag{2}$$

di mana c adalah kecepatan cahaya ruang hampa (3×10^8 m/s).

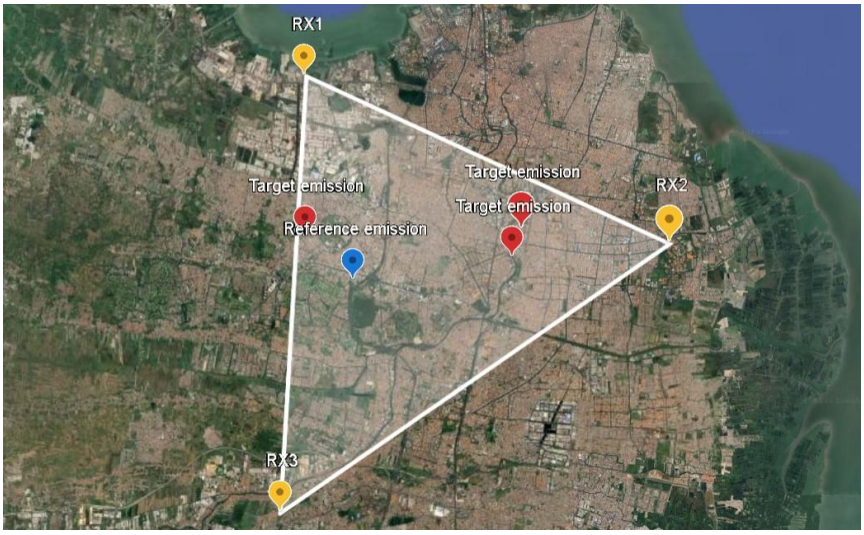
Dua himpunan DoA dari tiga sensor membentuk dua fungsi kurva hiperbola (Fis-cher 2014):

$$H_1 : (x - x_1)^2 - (y - y_1)^2 = (\Delta d_{12})^2 \tag{3}$$

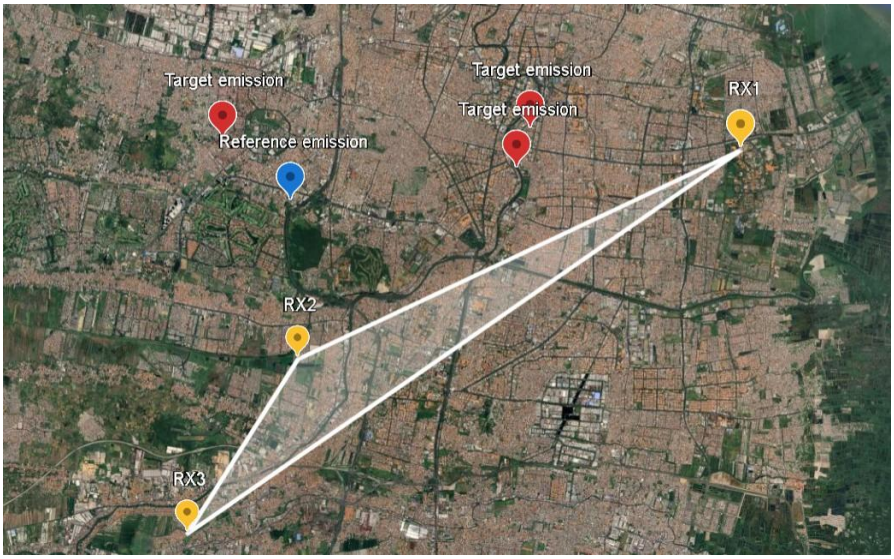
$$H_2 : (x - x_2)^2 - (y - y_2)^2 = (\Delta d_{23})^2 \tag{4}$$

Algoritma numerik Newton-Raphson diaplikasikan untuk melacak titik potong ekuilib-rium antara H_1 dan H_2, yang kemudian ditetapkan sebagai prediksi koordinat stasiun tar-get.

Skenario Geografis. Pengujian lapangan membandingkan dua skenario: skenario *di dalam segitiga* (perimeter poligon 43 km) di mana target berada murni di dalam caku-pan sensor, dan skenario *di luar segitiga* di mana target berlokasi di luar batasan sensor. Pengujian ini divariasikan pada tiga frekuensi radio target yang berbeda di lingkungan perkotaan nyata untuk melihat konsistensi sistem. Visualisasi kedua skenario ini dapat dilihat bersebelahan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Variasi letak geografis, metode pe-waktu, dan tiga frekuensi radio target ini menghasilkan total 360 sampel set data kom-paratif. Untuk memastikan keandalan hasil, data yang terkumpul dianalisis secara statis-tik dengan mengevaluasi nilai rentang deviasi (min-maks) dan persentase keberhasilan pengukuran di setiap skenario.

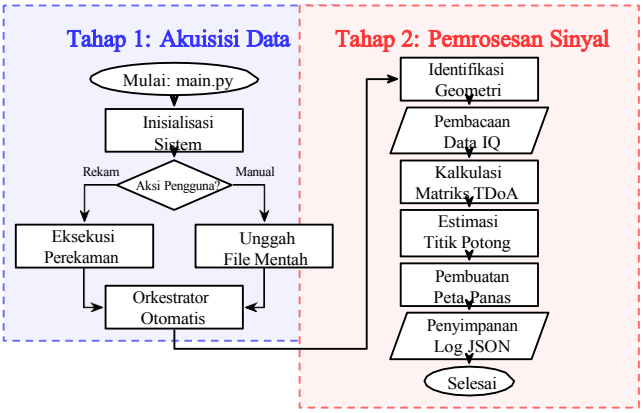


Gambar 3. Target di Dalam Segitiga Area Cakupan Sensor.



Gambar 4. Target di Luar Segitiga Area Cakupan Sensor.

Arsitektur Perangkat Lunak. Pengambilan dan pemrosesan data dikoordinasikan otomatis oleh *two-stage pipeline* di PC Master (Gambar 5). Pada Tahap 1, PC memicu rekam serempak tepat di perpindahan menit dengan skema *parallel threads*. Dit-erapkan jeda antar-injeksi 1 milidetik untuk mencegah *network collisions*. Pada Tahap 2, *file* biner mentah difilter menggunakan *Finite Impulse Response* (FIR) *low-pass* Parks-McClellan (*bandwidth* 40 kHz). Algoritma kemudian secara otonom menghasilkan peta interaktif JSON menggunakan Leaflet dan OpenStreetMap.



Gambar 5. Diagram blok arsitektur otomatisasi *pipeline* PC Master.

Metrik deviasi Euclidean (E) antara koordinat tebakan radar ($\hat{x}, \hat{y}$) dan koordinat lapangan asli ($x_{\text{true}}, y_{\text{true}}$) digunakan untuk mengevaluasi akurasi $A(\%)$, dengan toleransi batas deviasi keliru maksimal 2500 meter (Shao dkk. 2019). Batas 2500 meter ini ditetap-kan sebagai dasar perhitungan untuk mengakomodasi ambang batas toleransi kesalahan lokasi yang masih relevan dalam pelacakan sumber sinyal perkotaan skala luas. Persen-tase akurasi dihitung berdasarkan rasio kedekatan Euclidean sistem terhadap target aktual.

$$A(\%) = \max\left(0, 100 \times \left(1 - \frac{E}{2500}\right)\right) \quad (5)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dominasi Faktor Geometris terhadap Akurasi Lacak. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa letak geografis stasiun sensor jauh lebih memengaruhi tingkat akurasi dibandingkan dengan jenis instrumen sinkronisasi yang digunakan. Rangkuman hasil ini dapat diamati pada Tabel 1.

Tabel 1

Skenario	Metode	Eror (m)	Akurasi (%)	Sukses (%)
Dalam Segitiga	GPS (PPS)	423–1549	66.3–81.7	93–97
	NTP (LTE)	400–1494	67.6–84.0	96–100
Luar Segitiga	GPS (PPS)	850–4269	0.4–56.0	3–97
	NTP (LTE)	708–3953	0.5–61.9	3–97

Komparasi Akurasi Berdasarkan Skenario Geometri

Terlihat penurunan keandalan yang drastis sebesar 50–80 poin persentase ketika target berpindah dari dalam ke luar cakupan sensor. Dampak dari perubahan geometris ini menutupi dampak perbedaan metode waktu (GPS vs NTP) yang hanya berselisih sekitar

±2Ł 8%. Penurunan ini selaras dengan konsep *Geometric Dilution of Precision* (GDOP).

Saat target berada di dalam jangkauan sensor, garis hiperbola berpotongan dengan sudut tajam, sehingga galat observasi dapat diminimalkan. Namun, jika target menjauh, garis kurva menjadi nyaris sejajar yang membuat eror pelebaran ruang estimasi meroket tinggi secara eksponensial.

Kestabilan Referensi Waktu Perkotaan. Berlawanan dengan asumsi konvensional yang mengandalkan GPS sebagai instrumen kalibrasi utama, pengujian di Surabaya mendemonstrasikan bahwa sistem NTP berbasis 4G LTE justru memiliki performa yang lebih andal (lihat Tabel 2). Di lingkungan padat gedung, sinyal pantulan atau *multipath* sering membuat modul GPS kehilangan penguncian fasa dan waktu (*Phase-Locked Loop*) (Jedrzejewski dkk. 2022).

Tabel 2
Kestabilan Referensi Waktu di Area Perkotaan

Metrik Evaluasi	GPS (Satelit)	NTP (Jaringan 4G)
Kestabilan kuncian	Fluktuatif 80–85%	Sangat stabil > 99%
Insiden *loss of signal*	Terjadi 15–20%	Nyaris nihil (0%)
Deviasi *jitter* (1σ)	±890 ns	Konstan ±8 ms

Walaupun paket data NTP memiliki latensi jaringan sekitar 25 milidetik, fluktuasi perambatannya bersifat linear dan konstan pada setiap sesi akuisisi. Algoritma korelasi silang mampu mengeksploitasi konsistensi ini dengan merekam *offset* latensi via trans-misi sinyal referensi 100.0 MHz, dan menganulir galat tersebut secara komputasional. Berkat mekanisme ini, arsitektur yang menggunakan

NTP mencapai rasio keberhasilan 100% (tanpa peringatan *Not a Number*), mengalahkan sensor ber-GPS yang sering ter-henti mendadak akibat putusnya transmisi.

Komparasi Literatur. Sebagai perbandingan dengan kajian akademik lain, Tabel 3 memposisikan capaian pengujian ini terhadap penelitian sejenis.

Tabel 3
Komparasi Temuan terhadap Literatur Terkait

Kajian	Metode Uji	Akurasi	Batasan Utama
Schreiber & Bajer (2017)	Simulasi MATLAB	±10 meter	Kondisi semu/ideal
Irsyad dkk. (2024)	Uji Lapangan GPS	50–60%	Kendali manual
Kajian Ini	Lapangan Otomatis	**67–84%**	**Duel empiris NTP vs GPS**

Pengintegrasian NTP yang tangguh *multipath* bersama otomatisasi perangkat lu-nak berhasil menekan keterbatasan instrumen yang banyak ditemukan di penelitian se-belumnya. Sistem dapat dioperasikan untuk pemantauan berkelanjutan tanpa menguras tenaga sumber daya manusia.

SIMPULAN

Pembuktian kuantitatif dari 360 sampel data lapangan menunjukkan bahwa caku-pan area geografis merupakan faktor terpenting yang mendominasi akurasi sistem TDoA, memiliki pengaruh lima hingga enam kali lipat lebih besar dibanding variabel presisi in-strumen sinkronisasi. Untuk mendapatkan estimasi akurasi di atas 70%, target pemancar mutlak harus diposisikan di dalam poligon area penerima sensor radar.

Lebih lanjut, eksperimen ini membuktikan bahwa sinkronisasi *Network Time Protocol* (NTP) berbasis seluler lebih efisien, kebal halangan bangunan, dan mencapai tingkat keberhasilan data 100%. Namun, keunggulan NTP atas GPS konvensional ini

bergan-tung pada kualitas jaringan 4G LTE setempat serta tingginya efek multipath di area ur-ban pengujian, sehingga performanya dapat berbeda pada wilayah dengan karakteristik geografis atau infrastruktur jaringan yang berlainan. Instansi pengawas regulasi spek-trum karenanya direkomendasikan untuk memprioritaskan cakupan geografis sensor yang luas dibandingkan pengadaan alat pewaktu mahal, serta mempertimbangkan modul NTP seluler sebagai alternatif andal pada kondisi urban tertentu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro, khusus-nya Program Studi Teknik Telekomunikasi Politeknik Elektronika Negeri Surabaya. Dukungan penuh berupa perizinan akses infrastruktur dan fasilitas dari Laboratorium Pemrosesan Sinyal Telekomunikasi PENS sangat berperan vital dalam keberhasilan riset dan publikasi jurnal ini.

DAFTAR PUSTAKA

Fischer, S. (2014). *Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE* (Qualcomm Tech. Rep.).

Irsyad, A. N., Junaedi, N. A., Dutono, T., Satiti, R., Lestari, P. E. W., & Santoso, B. (2024). Reliability study of TDoA-based emission localization using simple RTL-SDRs. Dalam *Proceedings of the 2024 International Electronics Symposium (IES)* (hlm. 241–244). Surabaya, Indonesia.

ITU. (2011). *Handbook Spectrum Monitoring*. Jenewa.

Jedrzejewski, K., Malanowski, M., Kulpa, K., Krysik, P., & Pozoga, M. (2022). Passive space object observation using LOFAR radio telescope and software-defined radio receiver. Dalam *Proceedings of the 19th European Radar Conference (EuRAD)* (hlm. 1–4).

Kaderka, J., & Urbanec, T. (2020). Time and sample rate synchronization of RTL-

SDR using a GPS receiver. Dalam *Proceedings of the 2020 International Symposium Broadband Networks & Algorithms* (hlm. 1–8).

Panoradio SDR. (2017). *TDOA transmitter localization with RTL-SDRs*. Diambil dari https://panoradio-sdr.de/ tdoa-transmitter-localization-with-rtl-sdrs/

Panoradio SDR. (2019). *Correlation for time delay analysis*. Diambil dari https:// panoradio-sdr.de/correlation-for-time-delay-analysis

Rohde & Schwarz. (2015). *The best of both worlds—Hybrid radio location by conven-tional direction finding (AoA) and TDOA* (NEWS 212/15).

Scholl, S. (2019). *TDOA transmitter localization with RTL-SDRs*. Personal Blog.

Schreiber, J., & Bajer, M. (2017). Time difference measurement algorithm for TDOA positioning system using RTL-SDR. Dalam *Proceedings of the 10th Workshop Positioning Navigation Communication (WPNC)* (hlm. 608–612).

Shao, Y., Liu, F., Zheng, G., & Jiang, F. (2019). A method for improving three-point ranging accuracy under low SNR. Dalam *Proceedings of the 2019 IEEE Inter-national Conference on Signal Processing, Communications and Computing (IC-SPCC)* (hlm. 1–5).

Srun, C., Bunlin, B., Siren, S., Virbora, N., Un, S., & Nhek, S. (2023). Spectrum analyzer using software defined radio: A case study in Cambodia. Dalam *Proceedings of the 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manu-facturing Industrial Automation (ICAMIMIA)* (hlm. 1–6).

Zhou, D., Zhang, T., Liang, J., & Xu, W. (2020). Passive localization based on spectral estimation methods using sources of opportunity. Dalam *Proceedings of Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf Coast* (hlm. 1–8).