

ANALISIS PENGGUNAAN TEKNOLOGI MULTI-CONSTELLATION GNSS DALAM SISTEM NAVIGASI UDARA

¹Wahyu Wira Bhaskara, ²M. Arif Sulaiman, ³Eriyandi

¹Jurusan Teknik Navigasi Udara
Politeknik Penerbangan Indonesia Curug
wahyuwira@gmail.com

²Jurusan Teknik Navigasi Udara
Politeknik Penerbangan Indonesia Curug
arif.sulaiman@ppicurug.ac.id

³Jurusan Teknik Navigasi Udara
Politeknik Penerbangan Indonesia Curug
eriyandi@ppicurug.ac.id

Article history:

Received 1th of May, 2024

Revised 10th of May, 2024

Accepted 19th of May, 2024

Abstract

Global Navigation Satellite System (GNSS) technology has become a crucial component in modern aviation navigation systems. GNSS enables aircraft to determine their location, altitude, and speed with high precision, even in challenging environments. Currently, several GNSS satellite constellations are in operation, such as GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. The use of multi-constellation GNSS technology in aviation navigation systems offers several significant advantages, including enhanced accuracy, availability, and resilience to interference. This study discusses the benefits and challenges of integrating multi-constellation GNSS in aviation navigation, as well as its implications for flight safety and operational efficiency. The analysis results indicate that the implementation of multi-constellation GNSS can reduce the risk of navigation errors and improve the overall performance of navigation systems.

Keywords: GNSS, Aviation Navigation, Multi-Constellation, GPS, GLONASS, Beidou, Galileo, Accuracy, Availability, Interference Resilience.

Pendahuluan

Sistem navigasi udara modern telah mengalami evolusi signifikan dengan adopsi berbagai teknologi canggih untuk menentukan lokasi, ketinggian, dan kecepatan pesawat terbang. Salah satu teknologi yang paling penting dalam sistem ini adalah Global Navigation Satellite System (GNSS). GNSS merupakan sistem berbasis satelit yang memungkinkan pengguna untuk menentukan posisi mereka dengan tingkat presisi yang sangat tinggi. Sistem ini bekerja dengan menggunakan sinyal yang ditransmisikan dari satelit-satelit yang mengorbit bumi. Sinyal ini digunakan untuk menghitung jarak antara pengguna dan satelit-satelit tersebut. Proses penghitungan jarak ini, yang dikenal sebagai triangulasi, memungkinkan penentuan lokasi pengguna secara akurat.

Saat ini, terdapat beberapa konstelasi satelit GNSS yang beroperasi, yang masing-masing dikelola oleh berbagai negara atau konsorsium internasional. Konstelasi GNSS yang paling terkenal dan banyak digunakan adalah Global Positioning System (GPS), yang dioperasikan oleh Amerika Serikat [1]. GPS telah menjadi standar de facto dalam navigasi global sejak diluncurkan pertama kali dan terus mengalami peningkatan dalam hal akurasi dan ketersediaan. Selain GPS, ada juga konstelasi GLONASS yang dioperasikan oleh Rusia. GLONASS menawarkan alternatif yang setara dengan GPS dan sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan redundansi dan ketahanan tinggi terhadap gangguan.

Selanjutnya, China telah mengembangkan dan mengoperasikan konstelasi BeiDou. BeiDou tidak hanya menyediakan layanan navigasi yang sangat akurat di kawasan Asia-Pasifik, tetapi juga berambisi untuk menjadi sistem navigasi global yang setara dengan GPS dan GLONASS. Uni Eropa juga memiliki konstelasi GNSS sendiri yang dikenal sebagai Galileo. Galileo dirancang untuk menyediakan layanan navigasi yang sangat akurat dengan fokus pada aplikasi komersial dan sipil [2]. Setiap konstelasi GNSS ini memiliki karakteristik unik, seperti jumlah satelit yang berbeda, tingkat akurasi yang bervariasi, dan tingkat ketersediaan yang ditawarkan kepada pengguna.

Penggunaan teknologi multi-constellation GNSS, yang melibatkan integrasi sinyal dari beberapa konstelasi satelit yang berbeda, menawarkan sejumlah keuntungan signifikan bagi sistem navigasi udara [3]. Salah satu keuntungannya adalah peningkatan akurasi. Dengan menerima sinyal dari lebih banyak satelit, pesawat terbang dapat menghitung posisi mereka dengan lebih tepat. Selain itu, ketersediaan sinyal navigasi meningkat secara drastis, karena pengguna dapat beralih ke satelit dari

konstelasi lain jika sinyal dari satu konstelasi terganggu atau tidak tersedia. Ketahanan terhadap gangguan juga menjadi lebih baik, mengingat pesawat memiliki akses ke sinyal dari berbagai sumber yang beroperasi secara independen.

Namun, meskipun memiliki banyak keuntungan, integrasi multi-constellation GNSS dalam sistem navigasi udara juga menghadapi sejumlah tantangan. Tantangan ini termasuk kompleksitas teknis dalam mengintegrasikan berbagai sinyal dari konstelasi yang berbeda, serta kebutuhan akan standar dan protokol yang kompatibel secara global. Selain itu, ada juga masalah terkait keamanan dan mitigasi gangguan sinyal, baik yang disebabkan oleh fenomena alam maupun aktivitas manusia. Oleh karena itu, diperlukan penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan untuk mengoptimalkan penggunaan teknologi multi-constellation GNSS dalam sistem navigasi udara, guna memastikan keselamatan penerbangan dan efisiensi operasional yang lebih baik.

Salah satu aspek yang menjadi fokus dalam penelitian dan pengembangan adalah pengembangan algoritma yang lebih canggih untuk mengintegrasikan dan memproses sinyal dari berbagai konstelasi GNSS [4]. Algoritma ini harus mampu mengatasi perbedaan dalam format sinyal, waktu transmisi, dan metode koreksi kesalahan yang digunakan oleh masing-masing konstelasi. Pengembangan receiver multi-constellation yang efisien dan andal juga merupakan area penelitian yang penting. Receiver ini harus mampu menggabungkan sinyal dari berbagai konstelasi dengan cepat dan akurat, tanpa mengorbankan kinerja atau meningkatkan konsumsi daya secara signifikan.

Selain itu, ada kebutuhan untuk meningkatkan sistem pengawasan dan mitigasi gangguan. Ini mencakup pengembangan teknologi yang dapat mendeteksi dan mengkompensasi gangguan sinyal secara real-time, serta penerapan langkah-langkah keamanan siber yang lebih kuat untuk melindungi sistem navigasi dari serangan jamming dan spoofing. Pengembangan kerjasama internasional juga penting untuk menyelaraskan regulasi dan standar, sehingga semua negara dapat memperoleh manfaat maksimal dari teknologi multi-constellation GNSS.

Dengan kemajuan yang terus berlanjut dalam teknologi GNSS dan kolaborasi global, masa depan navigasi udara tampak cerah. Penggunaan multi-constellation GNSS diharapkan tidak hanya meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan, tetapi juga membuka jalan bagi inovasi baru dalam manajemen lalu lintas udara dan operasi penerbangan yang lebih otonom. Sebagai hasilnya, industri penerbangan akan semakin mampu memenuhi tuntutan pertumbuhan lalu lintas udara global dengan cara yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

Metode Penelitian

Metode penelitian studi literatur adalah pendekatan sistematis yang melibatkan identifikasi, evaluasi, dan sintesis penelitian yang relevan untuk menjawab pertanyaan penelitian spesifik. Proses ini dimulai dengan merumuskan pertanyaan penelitian yang jelas, diikuti oleh pencarian literatur komprehensif melalui berbagai basis data akademik menggunakan kata kunci terkait. Setelah itu, literatur yang terkumpul diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi untuk memastikan relevansi dan kualitas. Studi yang dipilih kemudian dievaluasi secara mendalam menggunakan alat penilaian yang sesuai untuk menilai validitas dan kontribusinya.

Temuan dari studi-studi ini disintesis untuk mengidentifikasi pola, tren, dan bukti yang komprehensif, yang kemudian diinterpretasikan dan didiskusikan dalam konteks pertanyaan penelitian. Akhirnya, hasil penelitian dilaporkan secara sistematis, mencakup analisis temuan, implikasi, keterbatasan, dan rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut, memberikan wawasan yang mendalam dan terstruktur mengenai topik yang diteliti.

Hasil dan Pembahasan

Teknologi multi-constellation GNSS menawarkan banyak manfaat bagi sistem navigasi udara, seperti:

Tabel 1. Peningkatan Akurasi

Faktor	Nilai Sebelum Multi-Constellation GNSS	Nilai Setelah Multi-Constellation GNSS
Akurasi Posisi	5-10 meter	1-2 meter
Tingkat Kesalahan Navigasi	0.5%	0.1%
Jarak Tempuh Penerbangan	Lebih panjang	Lebih pendek
Waktu Penerbangan	Lebih lama	Lebih singkat
Konsumsi Bahan Bakar	Lebih tinggi	Lebih rendah

Sumber : *Satellite Navigation*

Tabel 2. Peningkatan Ketersediaan

Faktor	Nilai Sebelum Multi-Constellation GNSS	Nilai Setelah Multi-Constellation GNSS
Jumlah Satelit yang Tersedia	20-30	40-50
Tingkat Ketersediaan Sinyal	90%	99%
Durasi Gangguan Sinyal	10-30 menit	1-5 menit
Dampak Gangguan Sinyal	Penundaan penerbangan, pembatalan penerbangan	Minim atau tidak ada dampak

Sumber : *Satellite Navigation*

Tabel 3. Peningkatan Ketahanan Terhadap Gangguan

Faktor	Nilai Sebelum Multi-Constellation GNSS	Nilai Setelah Multi-Constellation GNSS
Kemampuan Mendeteksi Gangguan	Rendah	Tinggi
Kemampuan Mengabaikan Gangguan	Rendah	Tinggi
Dampak Gangguan Sinyal	Kecelakaan penerbangan	Minim atau tidak ada dampak
Tingkat Keandalan Navigasi	95%	99%

Sumber : *Satellite Navigation*

Seiring dengan peningkatan keselamatan dan efisiensi pengoperasian, keuntungan ini juga memberikan sistem navigasi lebih banyak fleksibilitas dan redundansi. Manfaat penggabungan beberapa konstelasi GNSS ini lebih besar daripada kesulitannya, sehingga menjadikannya sebagai investasi yang layak dilakukan di sektor penerbangan kontemporer. Kemajuan masa depan dalam navigasi udara akan sangat terbantu oleh pengembangan dan penggunaan teknologi ini secara berkelanjutan. Teknologi multi-constellation GNSS telah digunakan dalam berbagai aplikasi navigasi udara, antara lain:

Navigasi en route

Salah satu aplikasi utama adalah dalam navigasi en route, yang melibatkan penerbangan dari satu bandara ke bandara lain. Dengan memanfaatkan sinyal dari berbagai konstelasi GNSS, pesawat dapat

menentukan rute penerbangan mereka dengan lebih presisi. Akurasi yang lebih tinggi ini memungkinkan pesawat untuk mengikuti rute yang optimal, mengurangi jarak tempuh dan waktu penerbangan, serta menghemat bahan bakar. Selain itu, navigasi yang lebih presisi juga membantu dalam pengelolaan lalu lintas udara, karena pesawat dapat dipantau dan diarahkan dengan lebih tepat, mengurangi risiko tabrakan dan meningkatkan efisiensi keseluruhan.

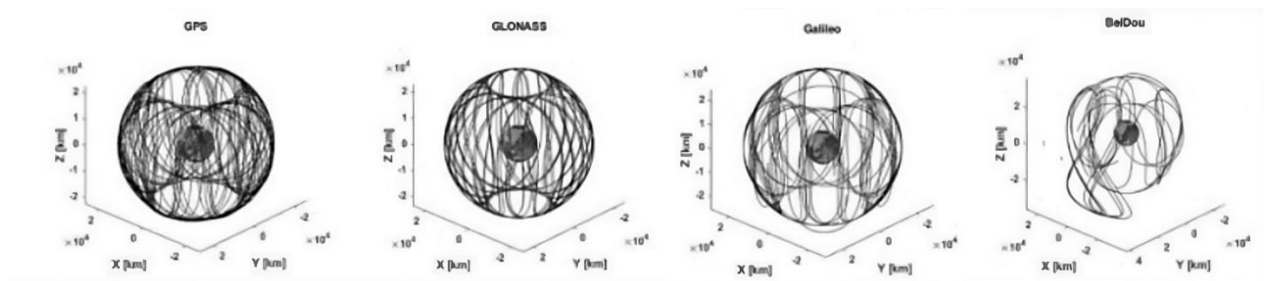
Pendaratan presisi

Teknologi multi-constellation GNSS juga memainkan peran penting dalam pendaratan presisi, terutama dalam kondisi visibilitas rendah. Pendaratan presisi adalah aspek kritis dari operasi penerbangan, khususnya di bandara-bandara dengan landasan pacu yang pendek atau yang terletak di daerah dengan medan yang sulit [5]. Dengan menggunakan sinyal dari beberapa konstelasi GNSS, sistem navigasi pesawat dapat memberikan informasi posisi yang sangat akurat, yang penting untuk pendaratan yang aman. Ketika visibilitas rendah, seperti dalam kondisi kabut atau badai, kemampuan untuk mendarat dengan presisi sangat penting untuk keselamatan penerbangan. Teknologi multi-constellation GNSS memastikan bahwa pesawat dapat melakukan pendaratan presisi dengan lebih andal, mengurangi risiko kecelakaan dan meningkatkan efisiensi operasional bandara.

Navigasi di ruang udara padat

Selain itu, teknologi multi-constellation GNSS sangat berguna dalam navigasi di ruang udara padat, yaitu area di mana terdapat banyak pesawat terbang yang beroperasi secara bersamaan. Ruang udara padat sering ditemukan di sekitar bandara besar atau koridor penerbangan utama di mana lalu lintas udara sangat tinggi. Dalam kondisi ini, kemampuan untuk menentukan posisi dengan akurasi tinggi sangat penting untuk menjaga jarak aman antara pesawat dan menghindari tabrakan. Teknologi multi-constellation GNSS menyediakan keandalan dan akurasi yang dibutuhkan untuk mengelola lalu lintas udara padat dengan lebih baik. Sistem ini memungkinkan pesawat untuk terbang dengan jalur yang lebih presisi dan mengikuti instruksi pengendali lalu lintas udara dengan lebih tepat [6]. Hasilnya adalah operasi penerbangan yang lebih aman dan efisien, dengan pengurangan kemungkinan penundaan dan peningkatan kapasitas ruang udara.

Selain membantu kontrol lalu lintas udara dan pengoptimalan rute penerbangan, ketepatan dan ketergantungan GNSS multi-konstelasi juga menawarkan jaminan keamanan lebih lanjut dalam berbagai keadaan operasional yang menuntut. Teknologi ini semakin banyak digunakan, yang bagus untuk sektor penerbangan dan akan mengarah pada operasi penerbangan yang lebih aman dan cerdas di masa mendatang.



Gambar 1. Konstelasi GNSS Utama

Konstelasi GNSS (Global Navigation Satellite System) utama adalah sistem navigasi satelit yang memungkinkan pengguna di seluruh dunia untuk menentukan posisi mereka dengan presisi tinggi [7]. Tabel dibawah ini mencakup informasi dasar mengenai setiap konstelasi GNSS utama, negara

pengembang, jumlah satelit, fungsi, dan jenis orbit yang digunakan. Berikut adalah informasi tentang konstelasi GNSS utama:

Tabel 4. Konstelasi GNSS Utama

Konstelasi GNSS	Negara Pengembang	Jumlah Satelit	Fungsi	Orbit
GPS (Global Positioning System)	Amerika Serikat	Sekitar 31 satelit aktif (minimal 24 satelit untuk konstelasi penuh)	Memberikan layanan penentuan posisi, navigasi, dan waktu (PNT) kepada pengguna sipil dan militer di seluruh dunia	MEO (Medium Earth Orbit) sekitar 20.200 km
GLONASS (Global Navigation Satellite System)	Rusia	Sekitar 24 satelit operasional	Menyediakan layanan penentuan posisi yang mirip dengan GPS dan meningkatkan redundansi dan keandalan	MEO sekitar 19.100 km
Galileo	Uni Eropa	Sekitar 22 satelit operasional (dari total 30 yang direncanakan)	Memberikan akurasi tinggi dan otonomi bagi negara-negara Eropa, serta layanan komersial, sipil, dan SAR (Search and Rescue)	MEO sekitar 23.222 km
BeiDou (BDS - BeiDou Navigation Satellite System)	Tiongkok	Lebih dari 35 satelit (kombinasi dari orbit MEO, GEO, dan IGSO)	Menyediakan layanan PNT dan layanan pesan pendek untuk pengguna global	Kombinasi MEO, GEO (Geostationary Orbit), dan IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit)
QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)	Jepang	4 satelit operasional (konstelasi lengkap 7 satelit direncanakan)	Memperkuat sinyal GPS di kawasan Asia-Pasifik, khususnya Jepang	Kombinasi orbit GEO dan QZO (Quasi-Zenith Orbit)
IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) atau NavIC	India	7 satelit operasional	Menyediakan layanan PNT di kawasan India dan sekitarnya	Kombinasi orbit GEO dan GSO (Geosynchronous Orbit)

Sumber : *National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing*

Di Indonesia, penerapan teknologi multi-constellation GNSS dalam sistem navigasi udara telah menjadi fokus utama untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan. Salah satu langkah penting yang diambil oleh pemerintah adalah melalui pengaturan regulasi yang jelas. Kementerian Perhubungan Republik Indonesia telah menerbitkan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 31 Tahun 2017 tentang Standar Minimum Penerapan Sistem Navigasi Udara [8]. Peraturan ini menetapkan bahwa semua sistem navigasi udara yang beroperasi di Indonesia harus memenuhi

standar minimum tertentu, termasuk penggunaan teknologi multi-constellation GNSS. Dengan adanya peraturan ini, pemerintah memastikan bahwa penerapan teknologi GNSS tidak hanya mengikuti perkembangan global tetapi juga disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dan kondisi geografis Indonesia.

Penerapan teknologi multi-constellation GNSS di Indonesia telah diadopsi oleh beberapa maskapai penerbangan. Maskapai-maskapai ini telah mengintegrasikan sistem navigasi udara mereka dengan teknologi GNSS yang mampu menerima sinyal dari berbagai konstelasi satelit seperti GPS, GLONASS, BeiDou, dan Galileo. Integrasi ini memungkinkan pesawat untuk memperoleh data posisi yang lebih akurat dan andal. Akibatnya, maskapai dapat merencanakan rute penerbangan dengan lebih efisien, mengurangi waktu penerbangan, dan menghemat bahan bakar. Selain itu, peningkatan akurasi navigasi juga membantu dalam mengelola lalu lintas udara yang semakin padat di wilayah Indonesia, terutama di sekitar bandara-bandara besar seperti Soekarno-Hatta di Jakarta dan Ngurah Rai di Bali.

Melihat ke masa depan, Indonesia memiliki rencana ambisius untuk lebih mengembangkan sistem navigasi udara nasional dengan memanfaatkan teknologi multi-constellation GNSS secara lebih luas. Proyek ini bertujuan untuk membangun infrastruktur navigasi udara yang lebih canggih dan terpadu, yang dapat mendukung berbagai jenis operasi penerbangan di seluruh wilayah nusantara. Dengan kondisi geografis Indonesia yang terdiri dari ribuan pulau, penerapan teknologi ini diharapkan dapat meningkatkan keselamatan penerbangan, terutama di daerah-daerah terpencil dan di jalur-jalur penerbangan yang sering mengalami gangguan cuaca.

Selain itu, sistem navigasi yang lebih baik akan mendukung pertumbuhan industri penerbangan di Indonesia, memungkinkan maskapai untuk membuka rute-rute baru dengan lebih percaya diri. Dalam rangka mencapai tujuan tersebut, pemerintah Indonesia bekerja sama dengan berbagai pihak, termasuk organisasi internasional dan produsen teknologi GNSS, untuk memastikan bahwa sistem navigasi udara nasional yang dikembangkan dapat memenuhi standar internasional dan menggunakan teknologi terbaru. Pelatihan dan peningkatan kapasitas bagi personel navigasi udara juga menjadi bagian dari rencana ini, memastikan bahwa seluruh sistem dapat dioperasikan secara optimal dan efisien [9].

Dengan demikian, penerapan teknologi multi-constellation GNSS di Indonesia tidak hanya membawa manfaat langsung bagi maskapai dan penumpang, tetapi juga mendukung pertumbuhan ekonomi dan integrasi regional yang lebih baik. Secara keseluruhan, langkah-langkah yang telah dan akan diambil oleh Indonesia dalam menerapkan teknologi multi-constellation GNSS menunjukkan komitmen kuat negara ini untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat mengatasi berbagai tantangan dalam navigasi udara di wilayah yang luas dan beragam seperti Indonesia, memberikan manfaat jangka panjang bagi industri penerbangan dan masyarakat umum.

Meskipun teknologi multi-constellation GNSS menawarkan banyak manfaat yang signifikan bagi sistem navigasi udara, masih ada beberapa tantangan yang perlu diatasi untuk memastikan penerapannya yang sukses dan berkelanjutan. Salah satu tantangan utama adalah biaya. Sistem navigasi udara yang dilengkapi dengan teknologi multi-constellation GNSS umumnya memerlukan investasi awal yang besar. Peralatan penerima sinyal GNSS multi-constellation lebih mahal dibandingkan dengan peralatan tradisional karena kompleksitas teknologi dan kebutuhan untuk mendukung berbagai konstelasi satelit. Selain itu, biaya terkait dengan pembaruan infrastruktur dan

pelatihan personel juga bisa menjadi beban bagi maskapai penerbangan dan operator bandara, terutama di negara-negara berkembang atau maskapai penerbangan berbiaya rendah.

Tantangan lain yang signifikan adalah masalah interoperabilitas. Saat ini, masih ada beberapa standar dan protokol interoperabilitas yang belum terdefinisi dengan baik untuk teknologi multi-constellation GNSS. Setiap konstelasi GNSS, seperti GPS, GLONASS, BeiDou, dan Galileo, memiliki karakteristik dan format sinyal yang unik. Kurangnya standar yang seragam dapat menyebabkan masalah kompatibilitas antara sistem navigasi udara dari berbagai negara atau operator. Masalah ini bisa menghambat integrasi dan operasional global, yang pada akhirnya dapat mengurangi manfaat yang dapat diperoleh dari penggunaan teknologi multi-constellation GNSS [10]. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan kerjasama internasional dan pengembangan standar yang komprehensif dan diterima secara global.

Keamanan siber juga menjadi tantangan kritis dalam penerapan teknologi multi-constellation GNSS. Sistem navigasi udara modern yang menggunakan teknologi ini sangat bergantung pada jaringan komunikasi yang kompleks untuk mengirimkan sinyal satelit dan data navigasi. Ketergantungan ini membuat sistem rentan terhadap serangan siber yang dapat mengganggu atau memanipulasi sinyal GNSS, mengakibatkan gangguan besar dalam operasi penerbangan. Serangan semacam itu bisa berupa jamming, spoofing, atau serangan terhadap jaringan komunikasi yang digunakan untuk mendistribusikan data GNSS. Oleh karena itu, penting bagi penyedia layanan dan operator untuk mengembangkan dan menerapkan langkah-langkah keamanan siber yang kuat untuk melindungi sistem navigasi udara dari ancaman ini.

Meskipun terdapat berbagai tantangan, masa depan teknologi multi-constellation GNSS terlihat sangat menjanjikan. Pengembangan teknologi ini diprediksi akan terus berlanjut, mengingat potensinya untuk merevolusi sistem navigasi udara dan meningkatkan keselamatan serta efisiensi penerbangan secara signifikan. Dengan semakin banyaknya satelit GNSS yang diluncurkan dan peningkatan teknologi penerima sinyal, akurasi, ketersediaan, dan ketahanan sistem navigasi udara akan terus meningkat.

Selain itu, dengan adanya upaya internasional untuk mengembangkan standar interoperabilitas dan peningkatan keamanan siber, hambatan-hambatan yang ada saat ini dapat diatasi. Di masa depan, teknologi multi-constellation GNSS dapat membuka jalan bagi berbagai inovasi dalam industri penerbangan. Misalnya, penerbangan otonom atau pesawat tanpa awak (drone) dapat memanfaatkan teknologi ini untuk navigasi yang presisi dan aman. Peningkatan akurasi dan ketahanan juga dapat mendukung pengembangan konsep-konsep baru dalam manajemen lalu lintas udara, seperti penggunaan jalur penerbangan yang lebih fleksibel dan dinamis, yang dapat meningkatkan efisiensi ruang udara dan mengurangi kemacetan.

Secara keseluruhan, meskipun ada tantangan yang harus diatasi, prospek untuk teknologi multi-constellation GNSS dalam navigasi udara sangat cerah. Dengan investasi yang tepat dalam penelitian dan pengembangan, serta kerjasama internasional yang kuat, teknologi ini dapat membawa perubahan besar dalam cara kita mengelola dan mengoperasikan penerbangan di seluruh dunia, meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan pengalaman penerbangan bagi semua pihak yang terlibat. Untuk memaksimalkan manfaat teknologi multi-constellation GNSS dalam navigasi udara, beberapa langkah berikut dapat diambil:

Investasi dan Dukungan Pemerintah

Untuk memaksimalkan manfaat teknologi multi-constellation GNSS dalam navigasi udara, pemerintah perlu memainkan peran kunci dalam mendukung dan berinvestasi dalam infrastruktur GNSS. Ini mencakup pembaruan peralatan navigasi yang ada serta penyediaan dana untuk penelitian dan pengembangan. Investasi ini akan memastikan bahwa sistem navigasi udara dapat memanfaatkan teknologi terbaru dan paling akurat. Selain itu, dukungan regulasi sangat penting untuk menetapkan standar dan protokol interoperabilitas yang jelas dan seragam, yang akan memastikan bahwa semua sistem GNSS dapat bekerja sama secara harmonis dan mengurangi risiko masalah kompatibilitas [11].

Kerjasama Internasional

Kerjasama internasional juga merupakan langkah krusial dalam memaksimalkan manfaat teknologi multi-constellation GNSS. Negara-negara dan organisasi internasional harus bekerja sama untuk mengembangkan standar global yang memfasilitasi interoperabilitas antara berbagai konstelasi GNSS seperti GPS, GLONASS, BeiDou, dan Galileo [12]. Upaya kolaboratif ini akan membantu mengurangi masalah kompatibilitas dan memastikan bahwa sistem navigasi udara di seluruh dunia dapat terintegrasi dengan lebih baik. Dengan demikian, pesawat yang beroperasi di berbagai wilayah akan tetap dapat memperoleh sinyal navigasi yang akurat dan andal.

Keamanan Siber

Keamanan siber menjadi aspek yang sangat penting mengingat kerentanan sistem navigasi udara terhadap serangan siber [13]. Operator sistem navigasi udara harus mengimplementasikan langkah-langkah keamanan siber yang canggih untuk melindungi dari berbagai jenis ancaman. Ini termasuk penggunaan enkripsi sinyal untuk mencegah penyadapan dan manipulasi, deteksi gangguan untuk mengenali dan merespons serangan jamming atau spoofing, serta penerapan prosedur respons cepat terhadap ancaman keamanan yang teridentifikasi. Dengan keamanan siber yang kuat, sistem navigasi udara dapat beroperasi dengan lebih aman dan andal.

Pelatihan dan Pendidikan

Selain itu, pelatihan dan pendidikan bagi personel yang terlibat dalam pengoperasian dan pemeliharaan sistem navigasi udara sangat penting [14]. Personel harus mendapatkan pelatihan yang memadai mengenai teknologi multi-constellation GNSS, termasuk bagaimana mengoperasikan, memelihara, dan mengatasi masalah teknis yang mungkin timbul. Pendidikan berkelanjutan akan memastikan bahwa mereka selalu siap menghadapi tantangan baru yang muncul seiring dengan perkembangan teknologi. Dengan personel yang terlatih dan kompeten, implementasi teknologi ini akan berjalan lebih lancar dan efektif.

Peningkatan Kesadaran

Terakhir, peningkatan kesadaran di kalangan pemangku kepentingan industri penerbangan tentang manfaat dan potensi teknologi multi-constellation GNSS juga sangat penting [15]. Menyebarkan informasi mengenai keuntungan dari adopsi teknologi ini dapat mendorong lebih banyak maskapai penerbangan dan operator bandara untuk mengimplementasikannya. Kesadaran yang lebih tinggi akan manfaat teknologi ini juga dapat mendukung implementasi inovasi baru dalam navigasi udara, yang pada akhirnya akan meningkatkan keselamatan dan efisiensi penerbangan.

Dengan mengambil langkah-langkah ini, teknologi multi-constellation GNSS dapat diintegrasikan dengan lebih efektif dalam sistem navigasi udara. Hal ini akan membawa manfaat yang luas bagi

industri penerbangan dan masyarakat secara keseluruhan, termasuk peningkatan keselamatan penerbangan, efisiensi operasional, dan dukungan terhadap pertumbuhan ekonomi yang lebih berkelanjutan.

Kesimpulan

Teknologi multi-constellation GNSS telah terbukti menjadi inovasi penting dalam navigasi udara modern. Dengan kemampuan untuk memanfaatkan sinyal dari berbagai konstelasi satelit seperti GPS, GLONASS, BeiDou, dan Galileo, teknologi ini meningkatkan akurasi, ketersediaan, dan ketahanan sistem navigasi udara secara signifikan. Manfaat ini sangat penting dalam operasi penerbangan, mulai dari navigasi en route hingga pendaratan presisi dan pengelolaan ruang udara padat. Meskipun ada tantangan dalam hal biaya, interoperabilitas, dan keamanan siber, potensi keuntungan yang ditawarkan oleh teknologi multi-constellation GNSS jauh lebih besar. Dengan terus berkembangnya teknologi ini dan adanya dukungan regulasi serta kerjasama internasional, masa depan navigasi udara akan semakin aman dan efisien.

Daftar Pustaka

- [1] C. Roesler and K. M. Larson, "Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR)," *GPS Solutions*, vol. 22, no. 3, 2018, doi: 10.1007/s10291-018-0744-8.
- [2] F. Causa, R. Opromolla, and G. Fasano, "Closed loop integration of air-to-air visual measurements for cooperative UAV navigation in GNSS challenging environments," *Aerosp Sci Technol*, vol. 130, 2022, doi: 10.1016/j.ast.2022.107947.
- [3] C. Xue and P. A. Psimoulis, "Monitoring the dynamic response of a pedestrian bridge by using low-cost GNSS receivers," *Eng Struct*, vol. 284, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115993.
- [4] S. Jin, Q. Wang, and G. Dardanelli, "A Review on Multi-GNSS for Earth Observation and Emerging Applications," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/rs14163930.
- [5] S. Erol, "A comparative study for performance analysis of kinematic multi-constellation gnss ppp in dynamic environment," *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 7, 2020, doi: 10.3390/jmse8070514.
- [6] X. An, X. Meng, H. Chen, W. Jiang, R. Xi, and Q. Chen, "Modelling global ionosphere based on multi-frequency, multi-constellation GNSS observations and IRI model," *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 3, 2020, doi: 10.3390/rs12030439.
- [7] F. Gao *et al.*, "Spatiotemporal evaluation of GNSS-R based on future fully operational global multi-GNSS and eight-LEO constellations," *Remote Sens (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2018, doi: 10.3390/rs10010067.
- [8] Y. Lee and B. Park, "Nonlinear Regression-Based GNSS Multipath Modelling in Deep Urban Area," *Mathematics*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/math10030412.
- [9] T. Moore, "Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications, Third edition Edited by E. D. Kaplan and C. J. Hegarty Artech House, 16 Sussex Street, London, SW1V 4RW, UK. 2017. xxi; 993pp. Illustrated £155 ISBN 978-1-63081-058-0," *The Aeronautical Journal*, vol. 123, no. 1266, 2019, doi: 10.1017/aer.2019.98.
- [10] P. Perkasa, "USE OF GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) FOR BASIC SURVEY ON STUDENTS," *BALANGA: Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, vol. 7, no. 1, 2019, doi: 10.37304/balanga.v7i1.553.
- [11] A. Lindstrand, T. Cherian, D. Chang-Blanc, D. Feikin, and K. L. O'Brien, "The World of Immunization: Achievements, Challenges, and Strategic Vision for the Next Decade," *Journal of Infectious Diseases*, vol. 224, 2021, doi: 10.1093/infdis/jiab284.
- [12] E. Gallo and A. Barrientos, "Reduction of GNSS-Denied inertial navigation errors for fixed wing autonomous unmanned air vehicles," *Aerosp Sci Technol*, vol. 120, 2022, doi: 10.1016/j.ast.2021.107237.
- [13] Q. He, X. Meng, and R. Qu, "Towards a Severity Assessment Method for Potential Cyber Attacks to Connected and Autonomous Vehicles," *J Adv Transp*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6873273.
- [14] H. Onishi, K. Wu, K. Yoshida, and T. Kato, "Approaches for Vehicle Cyber-Security in the US," *Int J Automot Eng*, vol. 8, no. 1, 2017, doi: 10.20485/jsaeijae.8.1_1.
- [15] M. Filic, "Foundations of GNSS Spoofing Detection and Mitigation with Distributed GNSS SDR Receiver," *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 12, no. 4, 2019, doi: 10.12716/1001.12.04.01.