

Deteksi Manuver Orbit Menggunakan Metode *Moving Windows Curve Fitting* (MWCF) (Orbital Maneuver Detection Using Moving Windows Curve Fitting (MWCF) Method)

Mohamad Fikri Aulya Nor¹, Ayu Dyah Pangestu²

¹Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung

²Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 06-11-2020

Direvisi: 14-12-2020

Disetujui: 14-12-2020

Korespondensi:

M.F.A.. Nor

mohfikri.aulyanor@s.itb.ac.id

ABSTRAK

Manuver orbit merupakan anomali atau perubahan drastis pada parameter orbit tertentu dalam waktu yang singkat untuk mempertahankan orbit satelit. Untuk mendeteksi hal tersebut, digunakan metode *moving windows curve fitting* (MWCF). Metode ini menggunakan analisis statistik parameter orbital tertentu dari data *two-line element* (TLE) satelit untuk mendeteksi pencilaan dalam segmen "jendela yang bergeser". Hasil deteksi manuver dari beberapa satelit menunjukkan bahwa selain konfigurasi parameter algoritma MWCF, pemilihan parameter orbit yang menjadi data landasan deteksi dan jenis satelit mempengaruhi performa deteksi. Karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver juga diperoleh, tetapi akurasi bergantung pada performa deteksi. Dari 567 variasi uji coba deteksi manuver, ternyata efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi dapat dikonfirmasi dengan adanya hubungan-hubungan linear di antaranya.

Kata kunci: deteksi manuver, *moving windows curve fitting*, *two-line element*

ABSTRACT

The orbital maneuver is an anomaly or a drastic change of certain orbital parameters in a short period of time in order to maintain the satellite's orbit. To detect the maneuver, we use the moving windows curve fitting (MWCF) method. This method uses statistical analysis of specific orbital parameters from satellites two-line element (TLE) data to detect outliers within each "running window" segments. The detection result from several satellites show that besides the configuration of MWCF algorithm's parameters, the orbital parameters that we use as the detection database and satellite's type are affecting the detection performance. We also obtained the orbital parameter characteristic when the maneuver happens, but the accuracy depends on the detection performance. From 567 detection experiment variations, evidently the effect of the configuration of MWCF algorithm's parameter on detection performance is confirmed by the linear relationships among them.

Keywords: maneuver detection, moving windows curve fitting, two-line element

1. Pendahuluan

Model orbital yang digunakan pada satelit bermacam-macam, salah satunya adalah *Simple General Perturbation 4* (SGP4). Model ini menghasilkan data

two-line element (TLE). Data ini memungkinkan penalaran gerakan objek antariksa secara cepat dan akurat (Vallado & Cefola, 2012). Namun, prediksi dengan model tersebut belum cukup karena adanya

space event, salah satunya manuver. Manuver orbit merupakan anomali atau perubahan drastis pada parameter orbit tertentu dalam waktu yang singkat untuk mempertahankan orbit satelit.

Banyak metode yang dikembangkan untuk melakukan deteksi manuver orbit. Terdapat dua arus besar perkembangan metode tersebut, yakni yang menggunakan penalaran orbit dan yang menggunakan analisis statistik dari nilai parameter-parameter orbit spesifik. Yang tergolong dalam kategori terakhir salah satunya adalah *moving windows curve fitting* (MWCF; Patera, 2008; Kececy et al., 2007; Li et al., 2018).

Dalam studi ini, metode MWCF digunakan untuk mendeteksi manuver orbit satelit dengan berbagai konfigurasi parameter. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi manuver dan mengetahui perbedaan karakteristik parameter orbit antara manuver dan evolusi alami orbit.

2. Data dan Metodologi

2.1. Metode *Moving Windows Curve Fitting* (MWCF)

Metode MWCF disebut sebagai “jendela” karena adanya segmen dengan panjang (*win*) m sampel data yang digunakan. Jendela ini berperan sebagai penyaring (*filter*) yang dapat “menghaluskan” tren data yang tidak konsisten akibat adanya anomali dengan *fitting* kurva. Dalam metode TTSA (Lemmens & Krag, 2014), panjangnya segmen dapat membesar hingga ukuran maksimal. Namun dalam studi ini, digunakan panjang segmen konstan, yaitu $win = 5, 7,$ dan 15 .

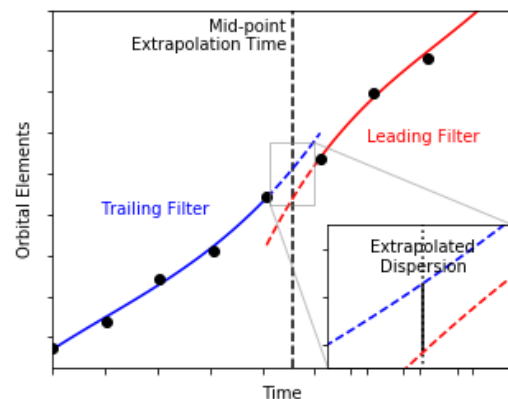
Fitting tersebut menghasilkan estimator nilai rata-rata untuk periode waktu tertentu yang akan bergeser dengan langkah tertentu (*sliding-average*). Dalam Li & Chen (2019), besar langkah (*step-size*) yang digunakan adalah setengah dari panjang jendela atau $m/2$. Tetapi dalam studi ini, digunakan besar langkah tetap, yaitu 1 , seperti yang dipaparkan dalam Chen et al. (2017).

Model *fitting* yang digunakan adalah fungsi polinom,

$$p(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n \quad (1)$$

dengan p adalah parameter orbit sebagai fungsi dari t atau seri waktu data TLE. Orde (*order*) yang digunakan biasanya adalah 3 (Chen et al., 2017). Dalam studi ini, digunakan nilai orde = $1, 3,$ dan 5 .

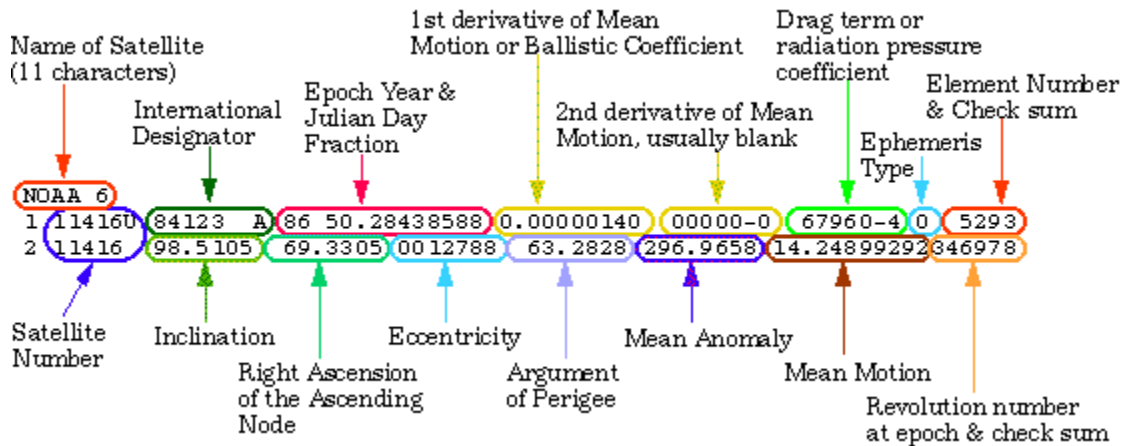
Menurut Patera (2008), *fitting* ini hanya valid di dalam jendelanya masing-masing. Namun dalam Kececy et al. (2007), digunakan *extrapolated difference* yang tidak sesuai dengan ketentuan tersebut. *Extrapolated difference* berperan sebagai dispersi nilai-nilai parameter orbit yang dihitung dari selisih nilai ekstrapolasi *leading filter* dan *trailing filter*. Pada dasarnya, kedua filter tersebut sama-sama merupakan jendela tempat *fitting* dilakukan, tetapi yang satu merupakan jendela depan (*leading*) dan yang satu merupakan jendela belakang (*trailing*).



Gambar 1. Ilustrasi dari *extrapolated dispersion/difference*.

Dispersi dari eksplorasi tadi digunakan untuk mendeteksi adanya manuver. Apabila terjadi perubahan parameter orbit yang mencolok, maka nilai dispersinya akan membesar secara drastis. Apabila nilai itu melampaui ambang batas tertentu ($n\sigma$), maka pada saat itu diduga terjadi manuver. Ambang batas yang digunakan dalam studi ini adalah $n = 1, 2,$ dan 3 .

Panjang jendela (*win*), orde polinom (*order*), dan ambang batas (n) dijadikan sebagai parameter algoritma MWCF. Namun, selain ketiga parameter di atas, terdapat sebuah parameter tambahan yang disebut *time lag*. Sebenarnya, *time lag* merupakan masalah intrinsik dalam data TLE mentah.



Gambar 2. Struktur data elemen orbit yang disimpan dalam format *Two-Line Element* (sumber: <https://spaceflight.nasa.gov/>).

Menurut Patera (2008), faktor ini menyebabkan jeda waktu selama 2-3 hari dengan simpangan baku 2,4 hari. Nilai ini digunakan dalam studi ini.

Performa deteksi dari metode ini diukur dengan peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi. Peluang deteksi benar adalah jumlah deteksi benar per jumlah total deteksi, sedangkan peluang manuver terdeteksi adalah jumlah manuver terdeteksi per jumlah manuver seharusnya—yang diperoleh dari data manuver satelit. Karena hanya menggunakan analisis statistik sederhana, secara komputasi, metode ini sangat efisien dan tidak memerlukan prediksi keadaan orbit (Chen *et al.*, 2017).

2.2. Sumber Data

Data yang menjadi basis deteksi manuver orbit satelit adalah set data TLE yang berasal dari *North American Aerospace Defense Command* (NORAD). Struktur data TLE terdiri dari dua baris yang mengandung data parameter orbit, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.

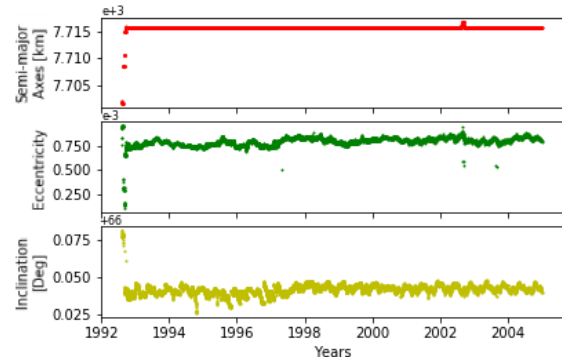
Parameter orbit yang digunakan adalah sumbu semi mayor, inklinasi, dan eksentrisitas. Sumbu semi mayor diperoleh dari persamaan,

$$a = \sqrt[3]{\frac{n^2 GM}{4\pi^2}} \tag{2}$$

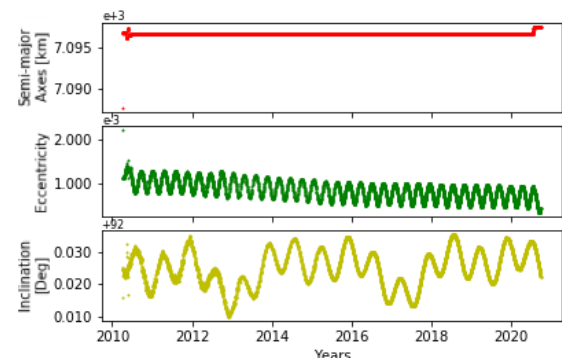
dengan n adalah gerak rerata yang tercantum dalam data TLE, G adalah konstanta gravitasi universal, dan M adalah massa Bumi. Ketiga parameter tersebut

dipilih karena *orbit control maneuver* menyebabkan perubahan inklinasi dan *control maneuver* menyebabkan perubahan sumbu semi mayor dan eksentrisitas.

Rujukan data dari *International Laser Ranging Service* (ILRS) digunakan untuk membandingkan hasil deteksi dengan manuver aktual. Dari sinilah performa deteksi dapat diukur.



Gambar 3: Data historis parameter orbit dari satelit Topex (22076).



Gambar 4: Data historis parameter orbit dari satelit Cryosat 2 (36508).

Sebelum digunakan untuk deteksi, data TLE mentah harus melalui tahap seleksi pencilan awal. Pencilan-pencilan ini dapat mengganggu performa deteksi sehingga perlu dieliminasi. Normalnya terdapat sekitar 20% pencilan yang berada di luar konteks *space event*. Dalam Chen *et al.* (2017), data pencilan diseleksi dengan data multidimensi dan jarak Mahalanobis. Namun, dalam studi ini cukup dilakukan dengan menggunakan data dalam rentang waktu tertentu yang tidak mengandung pencilan dengan simpangan yang tidak terlalu besar. Pencilan yang terlalu jauh bukan merupakan pencilan dalam konteks manuver, sehingga bisa disebut sebagai pencilan tidak wajar. Dalam hal ini, porsi data yang digunakan adalah 80% dari keseluruhan data.

Gambar 3 dan 4 merupakan tampilan data historis parameter orbit dari beberapa satelit yang dianalisis dalam studi ini. Seleksi pencilan dilakukan terhadap pencilan yang tak wajar pada kedua set data, yakni pada segmen awal dan tengah (untuk satelit Topex), serta akhir (untuk satelit Cryosat 2).

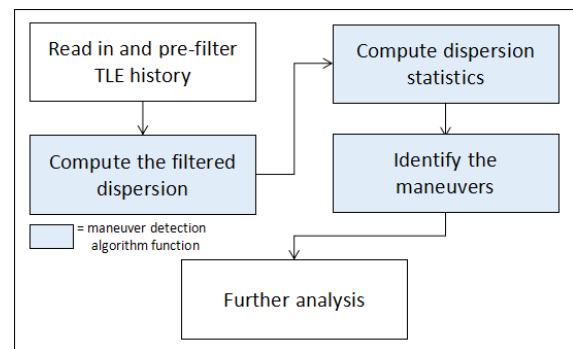
Pengecualian dilakukan untuk satelit Topex karena pencilan tak wajarnya berada di tengah, sehingga porsi data yang digunakan adalah 68%. Ini merupakan sebuah kekurangan metode MWCF dalam studi ini sehingga terjadi ketidakefektifan penggunaan data.

Seharusnya terdapat metode *pre-filter* data untuk mendeteksi pencilan yang tak wajar, tetapi tidak menyorot pencilan dalam konteks manuver.

2.3. Metode Penelitian

Setelah mengekstrak data TLE dan menyeleksi pencilan, dilakukan deteksi manuver dengan metode MWCF dengan berbagai parameter algoritmanya terhadap berbagai parameter orbit, mengikuti alur pada Gambar 5. manuver yang telah dideteksi akan dianalisis lebih lanjut mengenai karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver dan efek parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi.

Dalam analisis yang terakhir, digunakan model *Multiple Linear Regressions* (MLRs). Model MLRs digunakan untuk melakukan analisis regresi linear dengan lebih dari satu variabel bebas. Dari model tersebut, dilakukan uji-*T* individual dengan tingkat ke-



Gambar 5. Algoritma deteksi manuver berdasarkan metode MWCF.

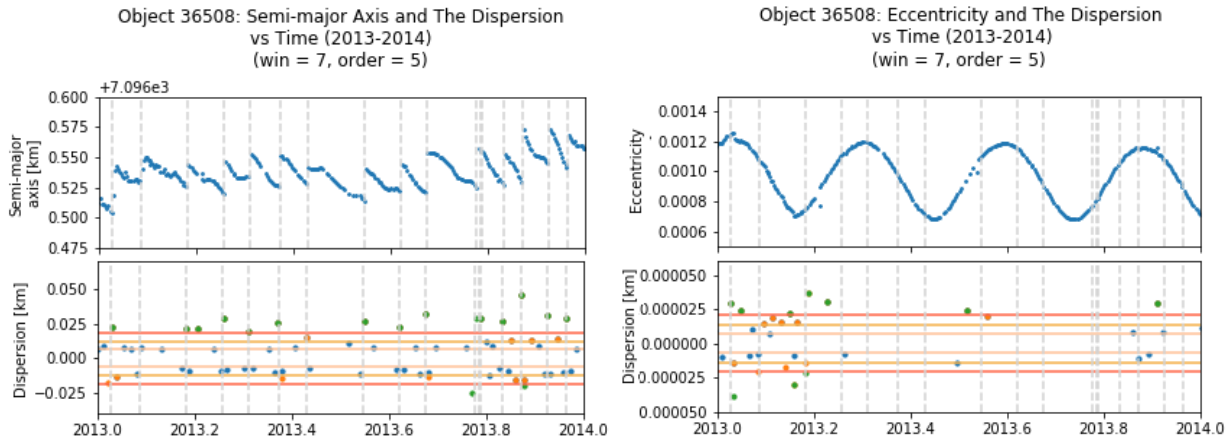
percayaan (*confidence level*) sebesar 95% untuk menyeleksi variabel yang signifikan. Selain itu, dilakukan juga analisis uji R^2 dengan batas nilai 80 untuk menentukan apakah model regresi linear ini cukup menggambarkan data (Walpole *et al.*, 2012).

Dalam studi ini, telah dilakukan deteksi manuver terhadap beberapa satelit, yaitu Cryosat 2 (36508), Envisat (27386), Jason-3 (41240), Saral (39086), Sentinel 3-A (41335), Sentinel 3-B (43437), dan Topex (22076). Satelit-satelit ini dipilih karena ketersediaan data TLE dan data manuvernya sehingga memungkinkan untuk dilakukan evaluasi performa deteksi.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil deteksi manuver orbit satelit dirangkum dalam Tabel 1. Hasil tersebut merupakan hasil deteksi dengan performa optimal (baik yang peluang deteksi benarnya maksimum, maupun peluang manuver terdeteksinya maksimum) di antara deteksi dengan berbagai konfigurasi parameter algoritma MWCF.

Setiap manuver dideteksi berdasarkan parameter orbit tertentu. Metode deteksi satelit harus memperhatikan pilihan parameter orbit karena hal tersebut mencerminkan *space event* atau anomali orbit tertentu (Chen *et al.*, 2017). Kebanyakan deteksi manuver dilakukan berdasarkan data sumbu semi mayor (a) dan inklinasi (i). Seharusnya eksentrisitas (e) juga dapat dijadikan sebagai landasan data deteksi manuver karena parameter ini terdampak oleh *control maneuver*. Oleh karena itu, perlu diselidiki pengaruh pemilihan parameter orbit terhadap performa deteksi.



Gambar 6. Plot antara parameter orbit dan dispersinya terhadap waktu dari hasil deteksi manuver satelit Cryosat 2 (36508) dengan $win = 7$ dan $order = 5$. Gambar di sebelah kanan adalah untuk eksentrisitas, sedangkan di sebelah kiri adalah untuk sumbu semi mayor. Garis horizontal berwarna kuning, oranye, dan merah menunjukkan ambang batas deteksi $n = 1, 2,$ dan 3 . Garis vertikal putus-putus merepresentasikan waktu terjadinya manuver. Titik-titik yang melewati ambang batas menandakan hasil deteksi. Dapat dilihat bahwa titik-titik pada grafik kiri hampir berhimpitan dengan garis-garis manuver, sedangkan titik-titik di grafik kanan terletak lebih acak, bahkan banyak garis manuver yang terlewatkan. Ini menunjukkan bahwa deteksi berlangsung cukup baik untuk data sumbu semi mayor, dan sebaliknya untuk data eksentrisitas.

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa data inklinasi dan data eksentrisitas tidak terlalu baik untuk digunakan dalam deteksi manuver. Tanpa meninjau jenis satelit, berdasarkan data tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya masing-masing hanyalah 42,3% dan 25,4%, sedangkan rata-rata peluang manuver terdeteksinya hanya sekitar 23%. Sementara itu, deteksi berdasarkan data sumbu semi mayor menunjukkan hasil optimal dengan rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 60,4%, sedangkan rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 30,2%. Perbedaan performa deteksi ini digambarkan lebih jelas dalam Gambar 6, yakni antara hasil deteksi manuver berdasarkan data sumbu semi mayor dan data eksentrisitas pada satelit dan konfigurasi parameter algoritma MWCF yang sama.

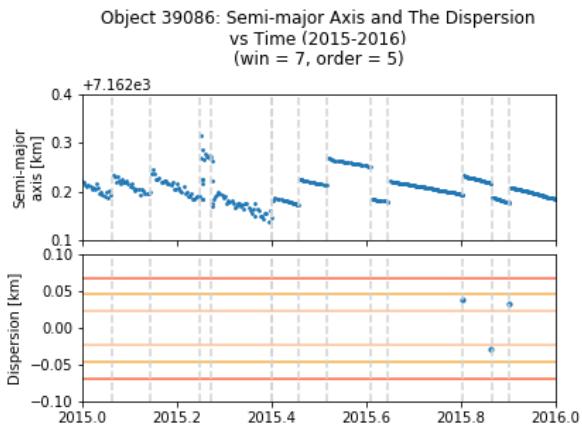
Selain faktor pemilihan parameter orbit, perbedaan satelit juga mempengaruhi performa deteksi. Hal ini dapat terjadi karena masing-masing satelit mempunyai kondisi unik, seperti ketinggian, tipe orbit, manuver yang dijalankan, dan akurasi data TLE-nya.

Dari ketujuh sampel satelit, yang memberikan hasil deteksi terbaik adalah satelit Sentinel 3-A, Sentinel 3-B, dan Cryosat 2. Peluang deteksi benar pada deteksi manuver satelit Sentinel 3-B

merupakan yang terbesar. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 66,4%. Namun, rata-rata peluang manuver terdeteksinya hanya 23,5%. Jadi meskipun cukup berhasil mendeteksi dengan benar, tetapi manuver yang belum terdeteksi masih sangat banyak.

Sementara itu, deteksi manuver satelit Sentinel 3-A menghasilkan peluang manuver terdeteksi yang terbesar. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya hanya 21,2%. Namun, rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 46,5%. Hasil ini hampir berkebalikan dengan hasil deteksi sebelumnya, yakni meskipun banyak manuver yang terdeteksi, tetapi hasil deteksinya cenderung lebih tidak akurat atau lebih sering mendeteksi anomali yang bukan manuver.

Satelit yang mempunyai performa yang cukup tinggi dan berimbang adalah satelit Cryosat 2. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 40,8% dan rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 32,9%. Interpretasinya adalah cukup banyak manuver yang terdeteksi dan hasil deteksi-



Gambar 7. Hasil deteksi manuver satelit Saral (39086) dengan $win = 7$ dan $order = 5$ dalam rentang waktu awal tahun 2015-2016. Keterangan lainnya sama dengan Gambar 6.

nya lebih bisa dipercaya.

Performa deteksi pada satelit-satelit lain tidak lebih baik daripada ketiga satelit tersebut, kecuali untuk satelit Saral yang mempunyai peluang deteksi benar rata-rata mencapai 55,0%. Namun, peluang manuver terdeteksinya hanya 12,8%, sehingga tidak termasuk sebagai hasil deteksi manuver yang terbaik. Gambar 7 merupakan hasil deteksi manuver pada satelit Saral dengan parameter orbit dan konfigurasi yang sama dengan hasil deteksi manuver pada satelit Cryosat 2 yang ditunjukkan oleh Gambar 6 (kiri). Dapat dilihat bahwa titik-titik deteksi pada Gambar 7 berada sangat tepat dengan terjadinya manuver, tetapi deteksi yang dihasilkannya sangat sedikit sehingga lebih banyak manuver terlewatkan dibanding hasil deteksi dari satelit Cryosat 2 pada Gambar 6.

Meskipun deteksi manuver dengan metode MWCF dalam studi ini belum sempurna, informasi perkiraan karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver dapat diperoleh. Karakteristik ini diperoleh dari ambang batas deteksi. Tabel 2 sampai 4 yang merangkum karakteristik tersebut akan menjawab pertanyaan mengenai kapan terjadinya manuver. Manuver diperkirakan terjadi ketika perubahan drastis pada sumbu semi mayor mencapai sekian meter, inklinasi mencapai sekian derajat, atau eksentrisitas mencapai nilai tertentu pada masing-masing satelit. Namun perkiraan tersebut akan semakin baik seiring meningkatnya performa deteksi.

Dari pembahasan sebelumnya, diketahui bahwa hasil deteksi sangat terpengaruh oleh pemilihan parameter orbit dan jenis satelit. Namun secara umum, performa deteksi merupakan produk dari algoritma MWCF itu sendiri. Diduga terdapat hubungan yang berlaku secara umum antara konfigurasi parameter algoritma MWCF (win , $order$, dan n) dan performa deteksi (peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi). Dalam studi ini, dilakukan analisis MLRs untuk mengetahui hubungan tersebut.

Analisis ini dilakukan terhadap hasil-hasil deteksi manuver dari seluruh variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF dalam studi ini ($3 \times 3 \times 3$ konfigurasi) untuk seluruh parameter orbit (3 parameter) dan untuk seluruh sampel satelit (7 satelit) sehingga totalnya menjadi $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 7 = 567$ variasi. Ternyata model MLRs tidak merepresentasikan hubungan antara konfigurasi parameter algoritma MWCF dan peluang deteksi benar. Hal ini karena nilai R^2 yang diperoleh kurang dari 80. Namun untuk hubungan antara konfigurasi parameter algoritma MWCF dan peluang manuver terdeteksi, model MLRs cukup memadai untuk sebagian kategori. Secara umum, ambang batas (n) memiliki hubungan linear negatif (dalam persamaan linear, koefisiennya negatif) dengan peluang manuver terdeteksi. Panjang segmen (win) juga memiliki hubungan serupa dengan peluang manuver terdeteksi, tetapi hanya berlaku pada data inklinasi.

Karena hubungan ini belum begitu tampak, dilakukan perombakan dalam model MLRs. Jika sebelumnya variabel respons yang merupakan parameter performa deteksi berupa peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi, kini variabel tersebut diubah menjadi jumlah deteksi benar, jumlah deteksi salah, dan manuver terlewatkan. Perombakan ini termasuk rasional karena kedua variabel respon yang lama merupakan turunan dari variabel respons yang baru.

Dalam analisis yang baru, dilakukan kembali analisis terhadap hasil-hasil deteksi manuver dari seluruh variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF untuk seluruh parameter orbit dan untuk seluruh sampel satelit. Hasil yang didapatkan cukup menarik

Tabel 1. Performa deteksi manuver dengan metode MWCF dengan beragam parameter *win-order-n*.

Parameter		Deteksi Benar (%)	Manuver Terdeteksi (%)
Orbit	MWCF		
Topex (22076)			
a	7-1-1	3,24	25,00
	15-1-3	22,50	18,18
i	5-1-1	2,67	27,27
	7-3-1	3,91	27,27
e	15-1-3	6,67	6,82
	15-5-1	3,21	27,27
	5-1-1	3,38	27,27
	5-3-3	13,89	9,09
	5-5-1	3,81	27,27
	7-1-1	3,68	27,27
	7-3-1	3,72	27,27
Envisat (27386)			
a	7-1-3	65,38	7,87
	15-5-1	39,18	15,17
i	7-3-1	34,02	20,79
	7-5-1	32,91	20,79
e	15-1-3	60,00	5,62
	5-5-3	50,00	9,55
	15-5-1	34,51	21,35
Cryosat 2 (36508)			
a	5-1-1	59,61	62,77
	5-5-3	84,95	36,50
	7-1-1	52,73	62,77
i	7-1-1	22,76	35,77
	7-5-3	30,19	12,41
e	5-1-1	29,07	30,66
	7-3-1	25,68	27,01
	7-5-1	25,98	26,28
	7-5-3	43,55	13,14
	15-1-3	26,92	5,84
Saral (39086)			
a	5-5-3	100,00	6,67
	15-5-1	78,57	16,67
	15-5-2	100,00	6,67
	7-1-2	100,00	10,00
i	7-5-2	54,55	10,00
	15-5-1	6,37	16,67
e	5-5-1	40,00	15,00
Sentinel 3-A (41335)			
a	5-5-3	26,92	46,51
	15-5-1	19,19	51,16
i	7-1-3	33,33	44,19
	15-3-2	20,37	46,51
e	7-3-1	20,00	41,86
	15-1-1	7,32	48,84

Tabel 1. (Lanjutan).

Parameter		Deteksi Benar (%)	Manuver Terdeteksi (%)
Orbit	MWCF		
Jason-3 (41240)			
a	5-1-2	70,37	37,93
	7-1-1	54,55	41,38
i	15-3-1	41,18	41,38
	5-1-1	10,85	34,48
	5-3-1	8,37	34,48
e	7-3-1	12,28	34,48
	7-3-2	9,82	34,48
	15-1-2	28,26	34,48
	15-1-3	39,13	27,59
	15-1-1	13,33	6,90
	15-5-1	34,51	21,35
Sentinel 3-B (43437)			
a	7-1-3	90,91	21,62
	7-3-1	77,42	32,43
	15-1-1	60,87	32,43
i	5-1-3	68,75	18,92
	5-3-2	80,00	18,92
	5-5-1	78,57	18,92
	5-5-2	71,43	18,92
	5-5-3	83,33	18,92
	7-1-3	66,67	18,92
	7-3-1	64,71	18,92
	7-3-2	72,73	18,92
	7-5-1	61,11	18,92
	7-5-2	69,57	18,92
e	7-5-3	52,94	18,92
	15-1-1	46,67	18,92
	15-1-2	41,18	18,92
	15-1-3	100,00	16,22
	15-3-1	48,00	18,92
	15-3-2	55,00	18,92
	5-1-3	88,89	13,51
	7-1-1	24,36	32,43

dan secara skematis ditampilkan dalam Tabel 5. Secara umum, panjang segmen jendela (*win*) mempunyai hubungan linear negatif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, kecuali untuk deteksi pada data eksentrisitas yang menunjukkan hubungan linear positif antara panjang segmen dan jumlah deteksi salah. Hal ini dapat dijelaskan dengan semakin panjang segmen jendela, semakin sedikit langkah jendela yang bergeser (jumlah *trailing* dan *leading filter*), sehingga semakin sedikit deteksi. Karena deteksi berdasarkan data eksentrisitas performanya terbukur, anomali

Tabel 2. Karakteristik manuver dilihat dari parameter sumbu semi mayor (*a*).

No. Satelit	Parameter MWCF	<i>a</i> (m)
22076	7-1-1	1,0
	15-1-3	3,2
27386	7-1-3	17,6
	15-5-1	7,3
36508	5-1-1	5,4
	5-5-3	20,5
	7-1-1	5,9
39086	5-5-3	74,4
	15-5-1	48,3
39086	15-5-2	28,0
41240	7-1-2	55,9
	5-1-2	1,7
41335	7-1-1	0,9
	15-3-1	1,0
	5-5-3	5,3
43437	15-5-1	2,1
	7-1-3	599,4
	7-3-1	208,4
	15-1-1	272,7

Tabel 3. Karakteristik manuver dilihat dari parameter eksentrisitas (*e*).

No. Satelit	Parameter MWCF	<i>e</i>
22076	5-1-1	6,95E-10
	5-3-3	3,11E-11
	5-5-1	1,04E-11
	7-1-1	6,69E-09
	7-3-1	8,84E-09
27386	5-5-3	3,46E-10
	15-5-1	5,93E-09
36508	5-1-1	5,52E-09
	7-3-1	6,90E-09
36508	7-5-1	6,90E-09
	7-5-3	2,07E-11
	15-1-3	2,78E-11
39086	5-5-1	2,58E-10
41240	15-1-1	3,76E-09
41335	7-3-1	1,71E-10
	15-1-1	9,41E-08
43437	5-1-3	6,45E-10
	7-1-1	2,19E-11

Tabel 4. Karakteristik manuver dilihat dari parameter inklinasi (*i*).

No. Satelit	Parameter MWCF	<i>i</i> (°)
22076	5-1-1	2,5
	7-3-1	3,0
	15-1-3	12,0
	15-5-1	3,3
	7-3-1	2,2
	7-5-1	2,2
	15-1-3	11,3
	7-1-1	0,8
	7-5-3	2,1
	7-5-2	0,0
36508	15-5-1	0,0
	5-1-1	1,1
	5-3-1	2,0
	7-3-1	1,4
	7-3-2	2,8
	15-1-2	1,9
	15-1-3	2,9
	7-1-3	10,9
	15-3-2	8,4
	5-1-3	14,9
41335	5-3-2	11,8
	5-5-1	5,9
	5-5-2	11,8
43437	5-5-3	17,7
	7-1-3	16,7
	7-3-1	5,5
	7-3-2	11,0
	7-5-1	5,5
	7-5-2	11,0
	7-5-3	16,4
	15-1-1	7,2
	15-1-2	14,5
	15-1-3	21,7
15-3-1	6,5	
15-3-2	13,0	

itu dapat dikesampingkan.

Pada panjang segmen jendela, ditemukan pula bahwa parameter tersebut mempunyai hubungan linear positif dengan jumlah manuver terlewatkan. Namun, hal ini hanya ditemukan dalam sebuah kasus, sehingga tidak diperoleh suatu simpulan.

Tabel 5. Hubungan antara parameter algoritma MWCF dan performa deteksi manuver berdasarkan analisis MLRs.

Parameter Orbit	Parameter Algoritma MWCF	Performa Deteksi Manuver		
		# Deteksi Benar	# Deteksi Salah	# Manuver Terlewat
a	win	linear negatif	linear negatif	linear positif
	order	linear positif	linear positif	-
	n	linear negatif	linear negatif	linear positif
i	win	linear negatif	linear negatif	-
	order	linear positif	linear positif	-
	n	linear negatif	linear negatif	linear positif
e	win	linear negatif	linear positif	-
	order	-	-	-
	n	linear negatif	linear negatif	linear positif

Sebaliknya, secara umum, orde polinom (*order*) mempunyai hubungan linear positif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, kecuali untuk deteksi berdasarkan data eksentrisitas karena model MLRs yang tidak cocok atau variabelnya tidak signifikan. Penjelasan terhadap hal ini adalah adanya kemungkinan *overfitting* pada orde polinom yang tinggi sehingga hasil *fitting* akan terlalu bergantung pada data dan menghasilkan dispersi yang lebih besar.

Terakhir adalah pengaruh ambang batas (*n*) terhadap performa deteksi. Secara umum, ambang batas mempunyai hubungan linear negatif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, serta hubungan linear positif dengan jumlah manuver terlewatkan. Hal ini terjadi karena semakin besar ambang batas, semakin sedikit jumlah anomali yang terdeteksi.

4. Kesimpulan

Metode MWCF telah digunakan untuk mendeteksi manuver orbit dari berbagai parameter orbit dari beberapa satelit. Total terdapat 567 variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF yang diterapkan dalam deteksi manuver dan diperoleh beberapa hasil deteksi dengan performa optimal.

Ternyata selain variasi konfigurasi tersebut, parameter orbit yang dipilih sebagai landasan data deteksi dan jenis satelit berpengaruh pada performa deteksi manuver. Untuk mendeteksi manuver, data sumbu semi mayor merupakan pilihan terbaik karena rata-rata peluang deteksi benar dan rata-rata peluang manuver terdeteksinya paling besar, yakni 60,4% dan 30,2%.

Penggunaan sumbu semi mayor sebagai parameter tunggal dinilai cukup dalam deteksi manuver dan bahkan justifikasi satelit operasional (Li & Chen, 2018).

Sementara itu, hasil deteksi manuver terbaik diperoleh dari data satelit Sentinel 3-A, Sentinel 3-B, dan Cryosat 2. Satelit Sentinel 3-A mempunyai peluang manuver terdeteksi terbesar, tetapi lebih sering mendeteksi anomali yang bukan manuver, sedangkan satelit Sentinel 3-B kebalikannya, yaitu mempunyai peluang deteksi benar terbesar, tetapi lebih sering melewatkan manuver. Di antara kedua ekstrem tersebut, terdapat satelit Cryosat 2 yang memiliki peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi cukup besar.

Dari hasil deteksi manuver tersebut, diperoleh beberapa karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver. Namun, karakteristik tersebut akan semakin baik apabila performa deteksi semakin baik.

Secara *apriori*, diduga terdapat efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi yang berlaku secara umum. Ternyata model MLRs cukup cocok untuk hubungan ini, tetapi dengan performa deteksi yang dirombak ke bentuk awalnya. Secara umum, panjang segmen jendela yang semakin panjang dapat menurunkan jumlah deteksi, baik benar maupun salah. Sementara itu, orde polinom yang semakin tinggi justru meningkatkan jumlah deteksi. Selain itu, semakin tinggi ambang batas yang digunakan, menurunkan hasil deteksi, tetapi meningkatkan jumlah manuver terlewatkan.

Keterbatasan metode ini adalah dalam seleksi pencilan awal yang menyebabkan penggunaan data yang tidak efisien. Selain itu, performa deteksi yang diperoleh juga masih belum sempurna, sehingga informasi karakteristik parameter orbit pada saat terjadi manuver bisa jadi tidak akurat. Diperlukan modifikasi untuk hasil deteksi yang lebih baik. Salah satunya adalah dengan memperoleh konfigurasi parameter algoritma MWCF yang menghasilkan performa terbaik, berdasarkan pengetahuan tentang hubungan kedua parameter tersebut. Kecepatan proses deteksi manuver juga dapat ditingkatkan dengan komputasi paralel (Clark & Lee, 2020).

Ucapan Terima Kasih

Sebagian dari pekerjaan ini didukung oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) melalui program *internship* 2020. Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Dr. Rhorom Priyatikanto atas bimbingan dan dorongan selama pengerjaan proyek ini, serta tenaga ahli lainnya di LAPAN. Kami ucapkan pula terima kasih kepada NORAD dan ILRS yang telah menyediakan sumber data dalam studi ini.

Pernyataan Kontribusi

M.F.A. Nor merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, melakukan pengolahan data dan analisis, serta menulis sebagian besar makalah. A.D. Pangestu membantu analisis dan penulisan makalah.

Rujukan

Chen, L., Bai, X.-Z., Liang, Y.-G., and Li, K.-B. (2017). Orbital Anomaly and Space Events Analysis, 247-297. In Chen, L., Bai, X.-Z., Liang, Y.-G., and Li, K.-B. *Orbital Data Applications for*

Space Objects: Conjunction Assessment and Situation Analysis. Springer, Singapore.

- Clark, R. & Lee, R. (2020). Parallel processing for orbital maneuver detection. *Advances in Space Research*, 66, 444-449.
- Kelecy, T., Hall, D., Hamada, K., Stocker, D. (2007). Satellite Maneuver Detection Using Two-line Elements Data, *Proceeding of the AMOS Conference*, Januari 2007.
- Lemmens, S. & Krag, H. (2014). Two-Line-Elements-Based Maneuver Detection Methods for Satellites in Low Earth Orbit. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 37(3), 860-868.
- Li, T., & Chen, L. (2018). Historical-orbital-data-based method for monitoring the operational status of satellites in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 151, 88-94.
- Li, T., Li, K., Chen, L. (2018). New manoeuvre detection method based on historical orbital data for low Earth orbit satellites. *Advances in Space Research*, 62(3), 554-567.
- Li, T. & Chen, L. (2019). Space event detection method based on cluster analysis of satellite historical orbital data. *Acta Astronautica*, 160, 414-420.
- Patera, R. (2008). Space Event Detection Method. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 45(3), 554-559.
- Vallado, D. & Cefola, P. (2012). Two-line element sets - Practice and use, *Proceeding of the International Astronautical Congress*, 5812-5825, Januari 2012.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K. (2012). *Probability & statistics for engineers and scientists, 9th Edition*. Pearson Education, Upper Saddle River.