t : الزمن بين عبور القمر لنقطة الحضيض عند to وزمن عبور القمر للنقطة M عند t_m حيث يكون $t_0 = t_m$ عندما تكون γ = صفر.

7-3 : الإقلاق وتصحيح المدار :

إن كل عنصر من عناصر المدار يمكن تغييره أما بواسطة الإقلاق الطبيعي نتيجة تأثير الغلاف الجوى، جاذبية الأرض، تفلطح الأرض وجاذبية القمر أو بواسطة مناورات تتم عن طريق أوامر ترسل من المحطات الأرضية إلى محركات القمر الصناعي.

Ω : إن اتجاه مستوى المدار يحدث له إقلاق بواسطة السبق العقدي Nodal Precession (حركة العقدة التقهقرية) وذلك نتيجة لتأثير انبعاج الكرة الأرضية عند الاستواء. فكلما زاد اقتراب القمر من الأرض أو زاد ميل المدار كلما زاد دوران مستوى المدار في الفضاء وبالتالي زادت سرعة حركة العقدة.

فإذا كانت i < 90 ° تكون حركة العقدة في اتجاه معاكس (من الشرق الى الغرب) لدوران الأرض حول محورها أو القمر فى مداره (من الغرب إلى الشرق). وإذا كانت i >90 ° تكون حركة العقدة في نفس اتجاه دوران الأرض حول محورها الشكل (3-15).

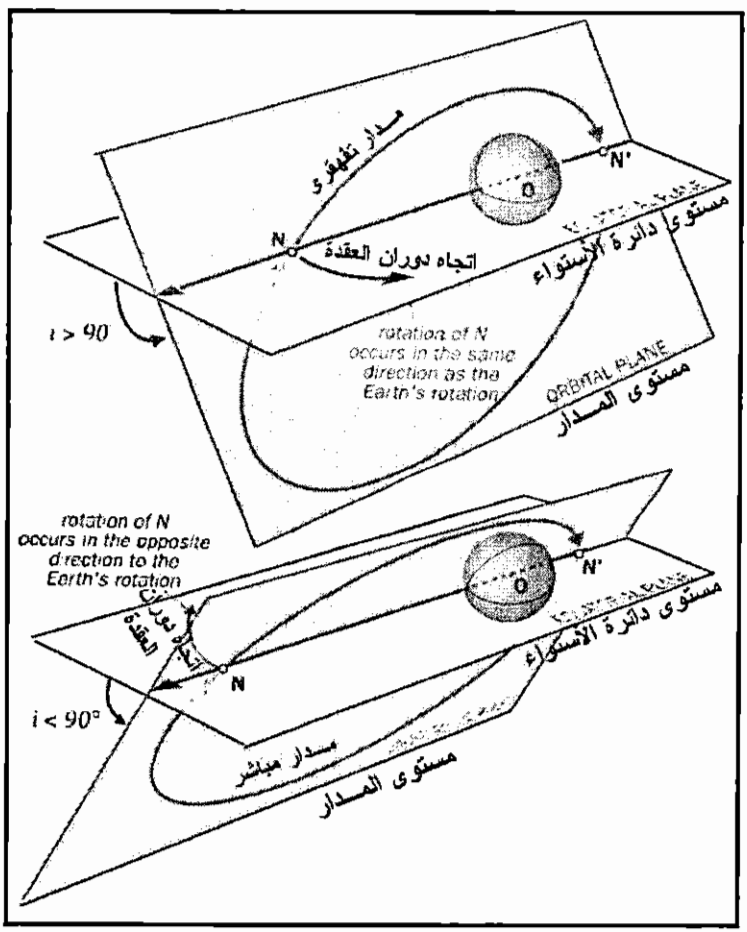
وأي مناورة تتم لتعديل Ω تكون مكلفة لاستخدامها مزيدا من الوقود لذلك يفضل الاستفادة من السبق العقدي الذي يحدثه الإقلاق الطبيعي نتيجة تفلطح الأرض.

i : هناك إقلاق طبيعي على ميل المدار نتيجة لتأثير جذب الشمس والقمر الطبيعي على القمر الصناعي. وهذا الإقلاق يمكن إهماله في المدارات المنخفضة ويكون ضعيفا على ارتفاع 40 ألف كم ولكنه يزداد مع زيادة ارتفاع نقطة أوج المدار عن 40 ألف كم. ولتعديل ميل المدار بمقدار Δi يمكن إعطاء القمر الصناعي دفعة بمحرك عند أحد عقد المدار مقدارها ΔV بزاوية $90^{o} + \Delta i/2$ مع اتجاه حركة القمر الشكل (3-16).

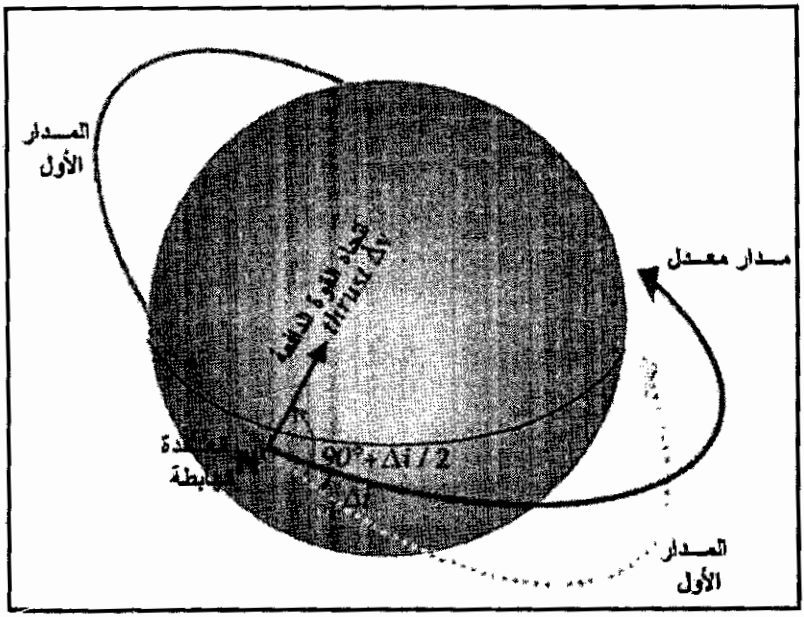
ω : وهناك إقلاق طبيعي يتم على الإزاحة الزاوية ω لنقطة الحضيض وتسمى بسبق خط القطر الأعظم Apsidal precession وهذا الإقلاق ناتج أيضا من انبعاج الأرض عند دائرة الاستواء. فكلما كان القمر أكثر قربا من الأرض ومداره أكثر ميلا عن 26 ° 63 ' كلما كان دوران محور المدار فى اتجاه معاكس لحركة القمر وبالتالى تغير موقع نقطة الحضيض بالنسبة للعقدة الشكل (3-17). ويكون السبق في نفس اتجاه حركة القمر إذا كان ميل المدار أقل من 26 ° 63 ' . ويتلاشى السبق تماما عندما

يكون الميل مساويا 26 ′ 63 ° ويسمى المدار في هذه الحالة بالمدار المتجمد Frozen orbit.

لإتمام مناورة لتعديل ω بمقدار $\Delta\omega$ يتم إعطاء دفعه ΔV في اتجاه مركز الأرض عند نقطة في المدار بحيث يصنع نصف قطر المدار زاوية $\Delta\omega$ /2 مع القطر الأعظم للمدار الشكل (3-18). وعندئذ يترك القمر المدار الأول عند هذه النقطة ليتخذ مدار جديد.



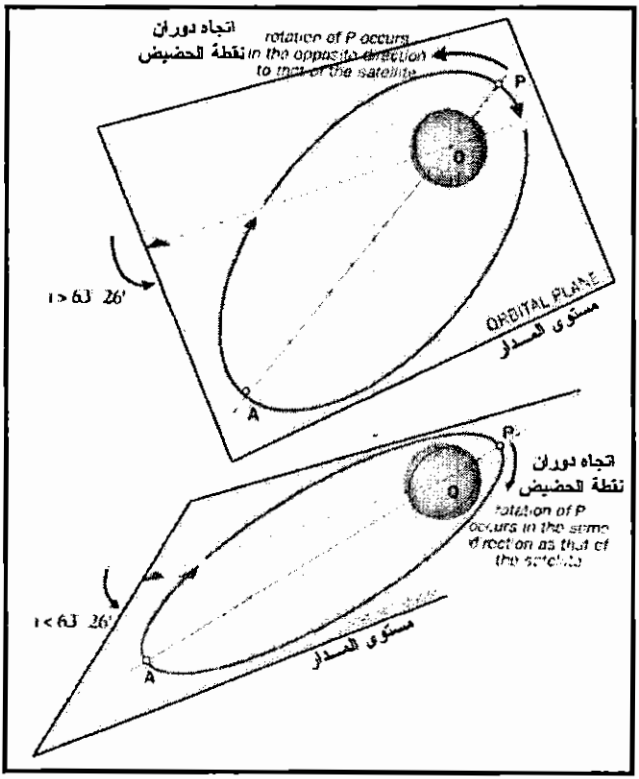
الشكل (3-15) اتجاه دوران العقدة.



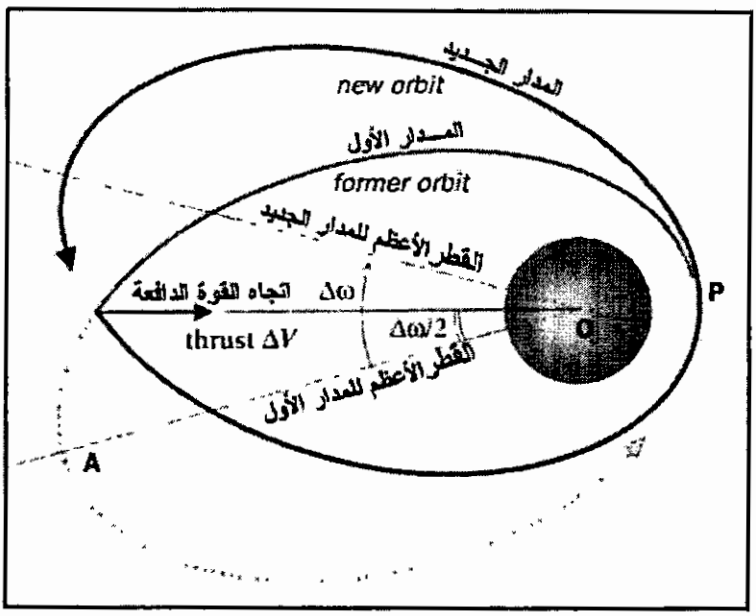
الشكل (3-16).
طريقة تعديل ميل مدار القمر

R : أن مقاومة الغلاف الجوى وضغط الإشعاع الشمسي على سطح القمر الصناعي تنقص ارتفاع نقطة الأوج للمدار عن مركز الأرض دون تغير ارتفاع نقطة الحضيض. لهذا كل المدارات البيضاوية نتيجة لهذا التأثير تصبح مدارات دائرية نصف قطرها يساوى ارتفاع نقطة الحضيض. وبمجرد أن يصبح المدار دائريا فان نصف قطره يتقلص تدريجيا ويتجه القمر للسقوط على الأرض متخذا مدارا حلزونيا.

يتحدد العمر الافتراضي Life time للقمر في المدار الدائري بفرض أن العامل الوحيد المؤثر هو مقاومة الغلاف الجوى للأرض تبعا للارتفاع كما هو موضح بالجدول (3-1):



الشكل (3-17). اتجاه دوران الحضيض تبعا لميل المدار.



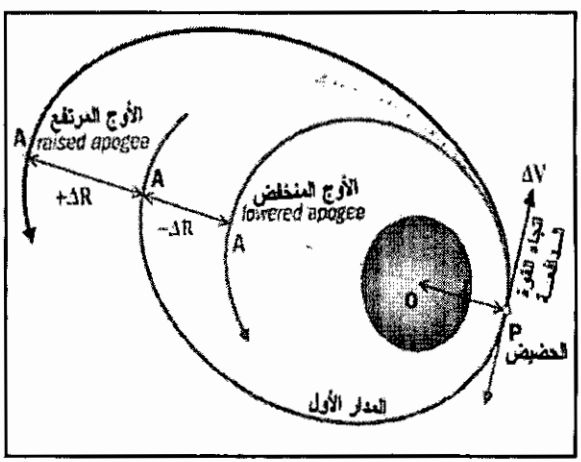
الشكل (3-18). تعديل اتجاه نقطة الحضيض

العمر الافتراضي	الارتفـــاع	العمر	الارتفـــاع
عدة أيام	200 كم	100 سنة	800 كم
عدة أسابيع	300 كم	عدة قرون	1000 كم
عدة سنوات	600 كم	ملايين السنين	30000 كم

الجدول (3-1) العمر الافتراضي للقمر.

ولإحداث تغير في بعد نقطة الأوج مقداره ΔR يتم إعطاء دفعة عند الحضيض في اتجاه حركة القمر لزيادة بعد الأوج. وإذا أردنا إنقاص ارتفاع الأوج تكون الدفعة عند الحضيض في اتجاه معاكس لاتجاه حركة القمر الشكل (3-19).

r : أما إذا أردنا تعديل r بمقدار Δr يتم إعطاء الدفعة ΔV عند الأوج في اتجاه حركة القمر لزيادة بعد الحضيض وفي عكس اتجاه حركة القمر لنقص ارتفاع الحضيض.



الشكل (3-19).
تعديل ارتفاع الأوج.

8-3 : مـدار هومان الانتقالي :

ولعمل مناورة maneuver للانتقال من مدار دائري حول الأرض إلى مدار دائري آخر أكبر منه، فإن المدار الانتقالي Transfer Orbit الذي سيتخذه القمر للانتقال من المدار الأول إلى الثاني سيكون مدارا بيضاويا، وهو أكثر الطرق اقتصادا في استهلاك الوقود وتسمى هذه المناورة بطريقة هومان Hohmann transfer حيث يكون المدار