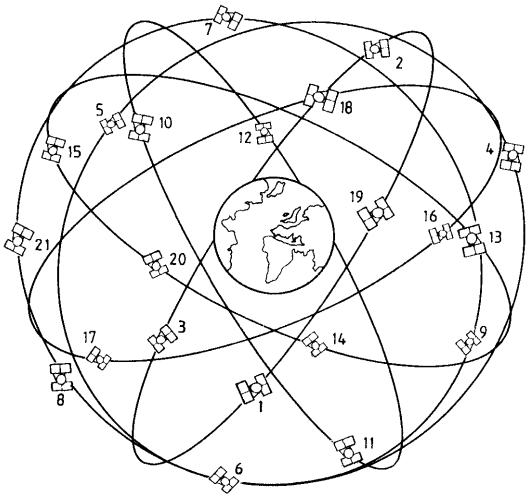
4 نظام التوضع العالمي *Global Positioning System GPS*

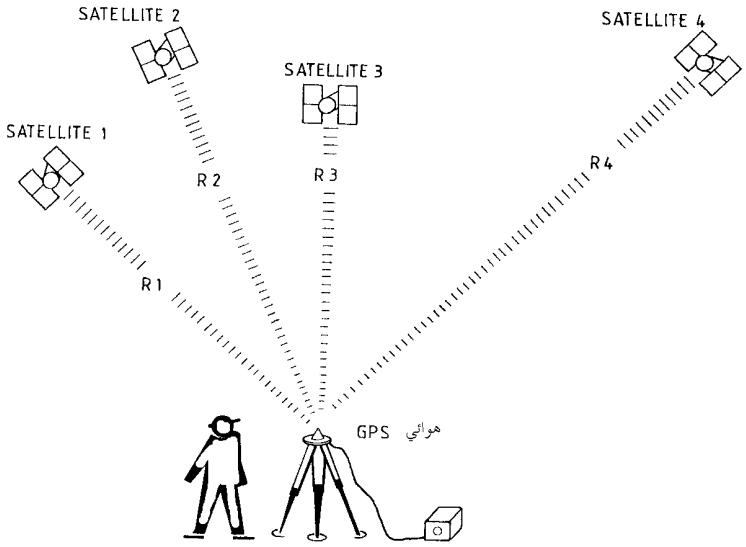
4.1 مدخل

إنّ نظام التوضع العالمي *NAVSTAR GPS* (*NAVigation System with Time and Ranging Global Positioning System*) هو نظام ملاحي يعتمد على موجات الراديو الصادرة من الأقمار الصناعية ويؤمّن بذلك معلومات دقيقة عن مواقع ثلاثية الأبعاد، ومعلومات ملاحية وعن الزمن للمستعملين المزوّدين بالأجهزة المناسبة. يمكن إستخدام النظام في كل أنحاء العالم وبشكل مستمر ومستقل عن الشروط الجوية. تم تطوير نظام ال *GPS* من قبل الولايات المتحدة الأمريكية منذ عام *1973* وهو بالأساس نظام عسكري. يتمتع المستخدمون المدنيون في العالم بإستخدام محدود له. لقد بدأ بإستخدامه لحلّ المسائل الجيوديزية منذ عام *1983*. يتألف النظام من مجموعته الكاملة من الأقمار الصناعية (*21* قمر) إضافة إلى ثلاثة أقمار *aktiv* إحتياطية فعالة (شكل *4.1*). الأقمار متوضّعة على مسارات بإرتفاع *20200 km* عن سطح الأرض. يؤمّن ترتيب التوزع الهندسي للأقمار تغطية لكلّ مناطق الأرض بحيث أنّه بأي وقت وفي أي مكان على الأرض هناك على الأقلّ أربعة أقمار واقعة فوق الأفق ويمكن رصدها بشكل متزامن *simultaneously*.



شكل *4.1*: نظام ال *GPS* المتألف من *21* قمر صناعي.

يعتمد مبدأ الملاحة الأساسي في نظام ال *GPS* على قياسات (آنية) لما يدعى أشباه المسافات *Pseudoranges* بين المستخدم وبين أربعة أقمار صناعية. يمكن تعيين إحداثيات المستخدم (محطة الإستقبال) إنطلاقا من إحداثيات القمر الصناعي المعرّفة في إطار مرجعي مناسب (شكل *4.2*). من وجهة نظر هندسيّة بحتة يكفي قياس المسافات إلى ثلاثة أقمار فقط. إن قياسا رابعا ضروري أيضا لأنّ نظام ال *GPS* يستخدم طريقة قياس المسافة بإتّجاه واحد (*one-way ranging technique*)، وساعة اللاقط *receiver clock* ليست متزامنة مع ساعة القمر. إن خطأ تزامن تلك الساعتين *synchroniyation error* هو سبب تسمية (أشباه المسافات) ويجب تعيينه كمجهول إضافي.



شكل *4.2*: قياس متزامن لأشباه الأطوال إلى أربعة أقمار.

مختلفا عن نظام ال *NNSS TRANSIT* (*Navy Navigation Satellite System*)، الذي كان معتمدا رسميا من قبل البحرية الأمركية *NAVY* منذ عام *1964*، فإن نظام *GPS* يؤمّن معلومات ملاحية في الزمن الحقيقي (لحظيا وفوريا *Real Time*)، ونظرا للتطور التقني خلال عشرين عاما فإن *GPS* يؤمّن دقّة أعلى بكثير من نظام الترانسيت *TRANSIT* (فقرة *1.4*). فيما يلي مقارنة بين خواص النظامين (جدول *4.1*).

الخاصة	*GPS*	*TRANSIT*
إرتفاع المسار	*20200 km*	*1000 km*
الطور *period*	*12 h*	*105 min*
الترددات *frequencies*	*1575 MHz*	*150 MHz*
	1227 MHz	*400 MHz*
المعطيات الملاحية	*X,Y,Z,t*: *4D* وسرعة	*Φ, λ* :*2D*
الجاهزية *availability*	متواصل	*15-20 min* خلال العبور الواحد
الدقة *accuracy*	*15 m (P-Code/SA)* *0.1* عقدة	*30-40 m* خطأ سرعة
مجموعة الأقمار	*21-24*	*4-6*
التوزع الهندسي	متكرر	متغيّر
ساعة القمر الصناعي	روبيديوم *rubidium*، سيزيوم *cesium*	كوارتز *quartz*

جدول *4.1*: مقارنة بين خواص نظامي ال *GPS* وال *TRANSIT*.

تمّ تصميم نظام التوضع العالمي *GPS* للحصول، لحظيا وفوريا *real time*، على دقّة ملاحية من *±10 m* إلى *±15 m*، وللإستعاضة عن نظام ال *Transit*. وقد كان منتظرا منذ البداية أن هذا النظام سوف يؤمّن قياسات جيوديزية بدقة عالية جدا. الباحث *Anderle 1979* توقّع، خلال مؤتمر للجيوديزيا بواسطة الأقمار الصناعية في أثينا، الحصول على دقّة *±10 cm* على مسافة *2000 km*. هذه الفكرة لاتزال موضوع نقاش، ولم يتمّ تحقيقها حتى الآن بالتطبيقات الروتينية. ولكن الخبرة العملية قد بيّنت أن تشكيلة واسعة من المسائل في الجيوديزيا والجيوديناميك تمّ إيجاد حلا لها بواسطة نظام ال *GPS*.

يمكن تقسيم مكوّنات نظام ال *GPS* إلى عدّة أقسام رئيسية:

- القسم الفضائي *Space Segment*: الأقمار الصناعية الفعّالة.
- قسم التحكم *Control Segment*: لمراقبة النظام والزمن، وحساب المسارات.
- قسم المستعمل *User Segment*: أنواع مختلفة من اللواقط *receivers*.

هناك نظام سوفييتي مشابه ل *GPS* يدعى *GLONASS* (فقرة *4.16.8*). إن المعلومات المفصّلة المتوفرة عن هذا النظام قد تم تداولها منذ فترة ليست بعيدة. يطرح عدّة من منتجي أجهزة الإستقبال *Receivers* الآن في الأسواق أجهزة تلتقط إشارات كلا النظامين للإستفادة من تغطية مثالية بإستخدام إشارات أقمارهما.

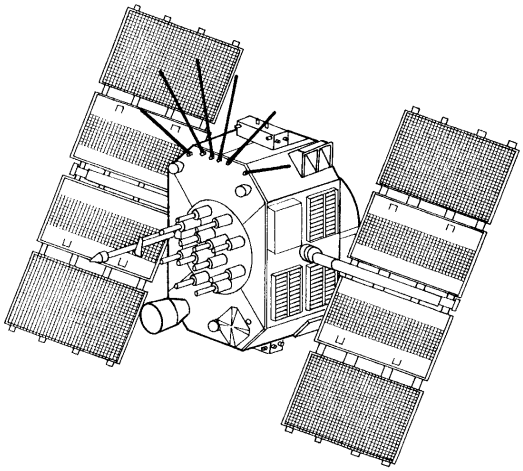
4.2 *القسم الفضائي* Space Segment

ويتألف من المجموعة الكاملة للأقمار الصناعية (*21* قمر صناعي) إضافة إلى ثلاثة أقمار إحتياطية فعّالة *aktiv* متوضّعة في مسارات دائرية تقريبا (قطع ناقص *Ellipse*) وموزعة على *6* مستويات ذات ميلان زاوي *Inclination* مقداره 55^o درجة، تتواجد *4* أقمار في كل مستو (شكل *4.1*). إرتفاع المدار هو *20200 km* تقريبا عن سطح الأرض وهو يوافق نصف قطر كبير للمدار *26600 km* تقريبا. زمن الدوران هو *12* ساعة بالضبط حسب الزمن النجمي *sidearial time*، بذلك يتكرر شكل التوزع الهندسي للأقمار يوميا بتسبيق زمني مقداره *4* دقائق بالنسبة للزمن العالمي *universal time* (فقرة *2.2.2*). إن فرق زاوية الصعود المستقيم *Right Ascension* Ω (فقرة *3.1.3*)، مقاسة على المستوي الإستوائي، بين كلّ من المستويات الستة للمدارات تبلغ *60* درجة.

أنماط الأقمار المستخدمة في الوقت الراهن هي *II, IIA, IIR*.

تمّ البدء بإطلاق أقمار نمط المجموعة *Block II* في عام *1989* وذلك بإستخدام صاروخ *McDonell Douglas Delta 2*. الديمومة (الحياة) التصميمية للقمر هي *7,5* سنة.

أقمار النمط *IIR* مزودة أيضا بإمكانيات قياس المسافات إلى أقمار أخرى لحساب إحداثيات كلّ أقمار المجموعة مباشرة ومن ثمّ إرسالها إلى محطات المراقبة الأرضية. الشكل *4.3* يبيّن تمثيلا لقمر من نمط *Block II*. تستمدّ الطاقة الكهربائية بواسطة صفيحتي إستقبال الطاقة الشمسية، يبلغ السطح المستقبل لكلّ واحدة منها مقدار $7,5\ m^2$. هناك بطارية إضافية لتأمين الطاقة أثناء تواجد القمر الصناعي في منطقة ظلّ الأرض (فقرة *3.2.2.5*). وزن القمر يبلغ *845 kg* وله نظام تسيير لتوازن موضعه في المدار. يتغير المدار كلّ عدّة أسابيع أو أشهر تغيّرا يمكن حسابه. يحمل كلّ قمر على متنه مولّدات موجات (ساعات ذريّة دقيقة) *Frequency Standards* عالية الدقة $1x10^{-13}$ - $1x10^{-12}$ (فقرة *2.2.5*) مشكّلة قاعدة زمنية دقيقة. أقمار النمط *II* مزوّدة بمولّدي موجات (ساعات ذرية) من الروبيديوم *rubidium* وإثنين من السيزيوم *cesium* (فقرة *2.2.5*).



شكل *4.3* : شكل تمثيلي لقمر من نمط *II*.

يولّده مولّد الترددات الموجود في القمر الصناعي تردّدا أساسيا ثابتا مقداره *10,23 MHz*. يرسل كل قمر إشاراتين بترددين مختلفين مشتقّين من هذا التردد الأساسي، وهما:

L_1 :154x10.23 MHz=1575.42 MHz (≙19.05 cm)

L_2 :120x10.23 MHz=1227.60 MHz (≙24.45 cm)

الإشارات المرسلة هي الإشارات الملاحية *Codes* (كود أو شيفرة)، ومعلومات ملاحية وعن النظام *Messages* (أو أخبار). الإشارات الملاحية *Codes* مضمّنة *modulated* وموجودة على الموجات الحاملة L_1,L_2 كمقاطع *Sequences* تدعى التشويش شبه العشوائي *pseudo random noise PRN*. الموجة الحاملة L_1 تحمل كلا الإشارتين الملاحيتين (*Codes* الشيفرات)، وهما الشيفرة الدقيقة *P-Code (Precise Code)*، والأقلّ دقّة *C/A-Code (Course Aquisition Code)*. الموجة الحاملة L_2 تحمل فقط الشيفرة الدقيقة *P-Code*. مناقشة مسهبة لإشارتي القمر سوف تتبع لاحقا (فقرة *4.4*).

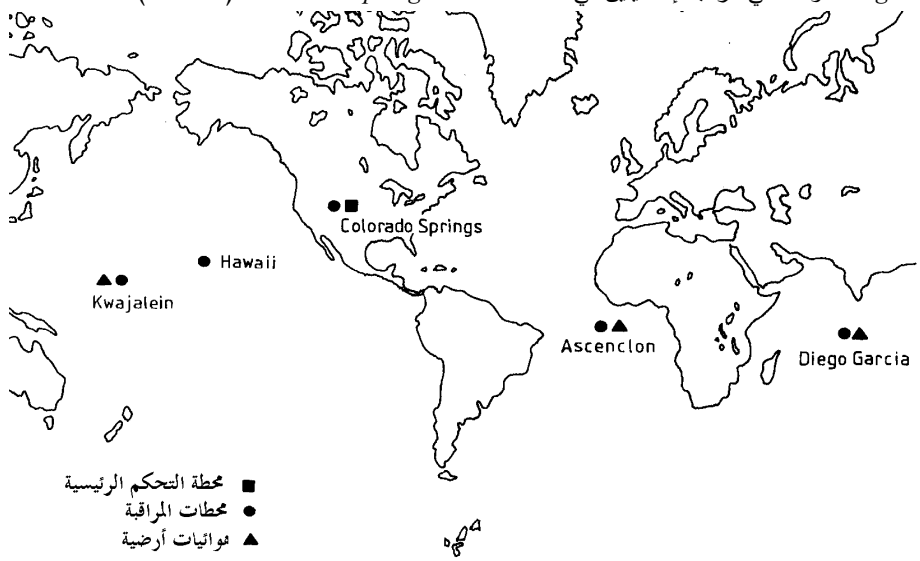
يتمّ تمييز الأقمار الصناعية إمّا برقم العربة الفضائية *Space Vehicle Number SVN* أو رقم القمر بالنظام *NAVSATR number*، المستند على مرحلة إطلاقه ورقم التشويش شبه العشوائي له *pseudo random noise PRN*. إنّ الطريقة الأخيرة موثوقة أكثر، نظرا لأنّ كلّ قمر يملك تشويشا شبه عشواي خاصا به *PRN* وأغلب الأجهزة المستعملة في الأسواق تميّز الأقمار بأرقامها هذه.

4.3 *قسم التحكم* Control Segment

مهمته:

- مراقبة النظام والتحكّم به بشكل مستمر
- تعيين زمن النظام *GPS System Time*
- التنبؤ بالمواقع اللاحقة للأقمار *Ephemeris* وسلوك ساعاتها (*Satellite Clocks* مولّدات الترددات)
- التجديد الدوري للمعلومات الملاحية *Navigation Messages* لكل قمر.

يتكوّن قسم التحكم والمراقبة من محطة التحكّم الرئيسية *Master Control Station MCS* وعدّة محطات مراقبة *Monitor Station MS* متوضعة حول العالم وهوائيات أرضية *Ground Anntena GA* من أجل تحميل المعطيات إلى الأقمار. إنّ قسم التحكّم الفعّال حاليا *Operational Control Segment OCS* لنظام *GPS* يتألف من *MCS* في كولورادو *Colorado Springs USA*، ثلاثة محطات مراقبة وهوائيات أرضية في كل من *Kajalein, Ascension and Diego Garcia*. ومحطتي مراقبة إضافيتين في *Colorado Springs and Hawaii* (شكل *4.4*).



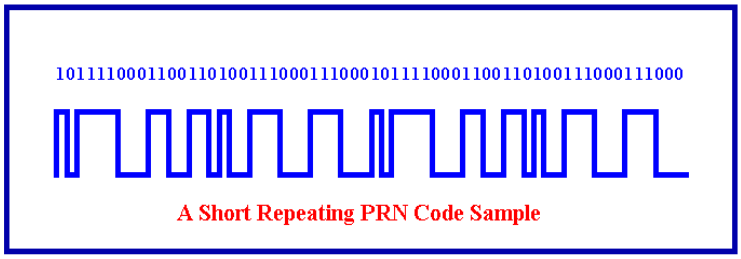
شكل *4.4* : قسم التحكم مع محطات الرصد.

تستقبل محطات المراقبة كلّ إشارات الأقمار وتحسب منها أشباه المسافات *Pseudoranges* لكل الأقمار المرصودة وترسل معطيات المسافات مع معطيات عن قياسات الأحوال الجوية *Meteorological data* المحلية إلى محطة التحكم الرئيسية *MCS*. تستخدم تلك المعطيات في محطة التحكم الرئيسية *MCS* لإعادة حساب المواقع اللاحقة للأقمار *Satellite*

Ephemeris و سلوك ساعاتها وتشكيل المعلومات الملاحية *Navigation Messages*. ترسل المعطيات الناتجة إلى الهوائيات الأرضية ليتمّ تحميلها (إرسالها) إلى الأقمار الممكن رصدها وذلك بواسطة موجات من الحزمة *S-Band S* (فقرة *2.3.3*). نظرا لتوزع الهوائيات الأرضية فهناك على الأقل ثلاث إتصالات باليوم بين قسم التحكم وبين كل قمر من الأقمار. يعيّن نظام *GPS* الزمني من مولّد ترددات *Oscillator* في محطة مراقبة مختارة. يحقق التوزع الجغرافي لمحطات المراقبة متطلبات نظام ملاحي فعّال. ولكن هذه التغطية ليست في كل الحالات مرضية للحصول على مسارات دقيقة لإستخدامها في التطبيقات الجيوديزية وبشكل خاص التطبيقات الجيوديناميكية. هناك شبكات محطات مراقبة مكثفة أكثر، تديرها مؤسسات مدنية وطنية ودولية.

4.4 مبدأ الرصد وتركيب الإشارة *Observation Principle and Signal Structure*

تقاس المسافات في نظام ال *GPS* بإتجاه واحد. إن القياس الأساسي هو زمن إنتقال الإشارة من هوائي القمر الصناعي إلى هوائي اللاقط على الأرض. يتمّ تحويل هذا القياس إلى مسافة وذلك إعتمادا على سرعة إنتشار الإشارة (فقرة *2.3*). بشكل عام لايمكن إفتراض أن الساعتين متزامنتين بدقة (ساعتي القمر واللاقط). لذلك يحتوي زمن إنتشار الإشارة المقاس خطأ تزامن نظامي (*Time bias*). تدعى الأطوال المغلوطة الناتجة بأشباه الأطوال *Pseudorange*، لذلك يمكن إعتبار مبدأ القياس الأساسي في نظام ال *GPS* هو تعيين أشباه الأطوال. الشكل *4.2* يبيّن أننا نحتاج لقياس أشباه الأطوال إلى أربع أقمار بشكل متزامن للحصول على الإحداثيات الثلاثية لهوائي نقطة الرصد وخطأ تزامن الساعة. كمعطيات يجب أن يتوفر لدينا إحداثيات وزمن (*Satellite Time*) معروفة للقمر. يجب على إشارات نظام ال *GPS* أن تؤمّن طريقة لتحديد الموقع في الزمن الحقيقي (*Real Time*). يتمّ تحقيق ذلك بتضمين *modulating* الإشارة الحاملة بما يدعى شيفرة التشويش شبه العشوائي *Code PRN*، وهو عبارة عن مجموعات من قيم ثنائية (إما صفر أو واحد، أو إما *1-* أو *1+*) والتي يبدو أنها عشوائية، ولكن يمكن أن تعرّف بدقة (شكل *4.5*). يتم إشتقاق أشباه الأطوال من زمن إنتشار إشارة ذات كود *PRN* معروف. هناك نوعين من الكود (الشيفرة) كما تمّ ذكره سابقا، الأول هو *P-Code* (*Precise* دقيق أو *Protected* محمي) والثاني *C/A-Code* (*Clear Aquisition* إلتقاط واضح).



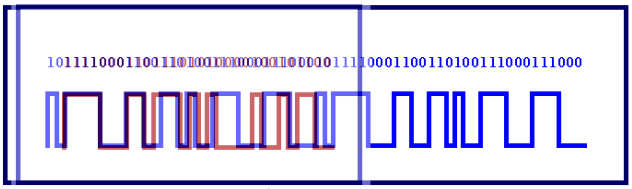
شكل *4.5*: جزء من شيفرة التشويش شبه العشوائي.

إن تردد ال *P-Code* يبلغ *10.23 Mhz* (وهو التردد الأساسي لساعة القمر الصناعي). هذا يعني *10.23* مليون قيمة ثنائية (في النظام العددي الثنائي *Binary*) في الثانية، ويمكن القول (*10.23 million Chip/second*). إن طول الموجة الموافق لكل *Chip* هو حوالي *30 m*. إن طول هذا الكود (الشيفرة) هو *266* يوم، تخصّص أجزاء منه (بطول *7* أيام لكل جزء) لأقمار متعددة. نتيجة لذلك يمكن لكل الأقمار أن ترسل إشارات بنفس التردد، ولكن كل قمر يعرّف نفسه بواسطة الجزء الخاص به من الشيفرة التي يبلغ طولها *7* أيام. هذه الأجزاء تجدّد كل إسبوع (تعطى قيمة الصفر) وذلك في منتصف ليلة كل سبت الساعة صفر حسب التوقيت العالمي *0^h UT*. هذا الكود (الشيفرة *P-Code*) هو الكود الرئيسي في الملاحة ومحمّل على كل من الإشارتين *L_1,L_2*.

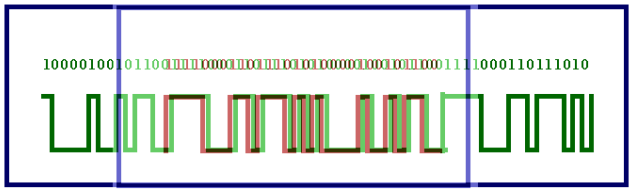
يبلغ طول الشيفرة الأخرى *C/A-Code* *1* ميللي ثانية، وهذا يوافق ترددا قدره *f_0/10=1.023 Mhz* (جدول *4.2*)، وهذا يعني أن تردد قيم التضمين (*1-*, *1+*) يساوي *1.023 MHz* (*1.023* مليون مرة كل ثانية). بإعتبار أن طول فترة الشيفرة *1 ms* يكون عدد العناصر (*1+* أو *1-*) هو *1.023 MHz x1 ms=1023* عنصر. نسبة تردد الموجة الحاملة إلى تردد الشيفرة هي *10.23 x154/1.023=1540*. وهذا يعني أنه كل *1540* طول موجة من الموجة الحاملة يظهر عنصر

تضمين، وبإعتبار أن $\lambda=0.19\ m$ ينتج طول الموجة للشيفرة $0.19\ m \times 1540=293\ m$. يتم تحميل هذا الكود حاليا فقط على الإشارة الحاملة L_1.

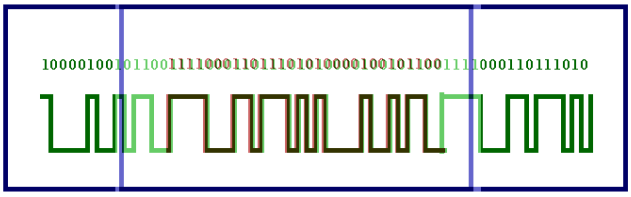
لتعيين زمن إنتشار إشارة القمر الملتقطة يحتاج المستعمل إلى نسخة من جزء الكود (الموجود على إشارة القمر) داخل اللاقط. يتم الحصول على الزمن Δt من خلال عملية الإرتباط *cross correlation* بين الإشارتين الملتقطة والمولّدة في اللاقط. يصار في هذه العملية إلى جداء الإشارتين وتكوين تابع الإرتباط *correlation function*. من إحدى ميزات التشويش شبه العشوائي *PRN* أنه يأخذ القيمة *+1* (إرتباط أعظمي) فقط في حال تطابق التردد والطور وتضمين الطور للإشارتين معا. بعد تطابق الترددين والطورين يتم زيحان (تغيير الطور *Phase Shift*) جزء الشيفرة هذا مع الزمن وبالتدريج وتتمّ دراسة إرتباطه مع إشارة الكود الملتقطة وذلك حتى يتم الحصول على إرتباط أعظمي (شكل *4.6*). زمن الإنزياح *time delay* اللازم لذلك (في جزئي الكود المعالجين) هو مقياس لزمن إنتشار الإشارة بين هوائيي القمر واللاقط على الأرض. هذه الطريقة تدعى رصد طور الشيفرة *Code Phase Observation*.



عدم وجود إرتباط بين جزئين مختلفين من PRN



إرتباط جزئي بين شيفرتي اللاقط والقمر



إرتباط كامل بين شيفرتي اللاقط والقمر

شكل *4.6*: زيحان أجزاء الكود (جزء يولّد في اللاقط والآخر يتمّ إستقباله من القمر) للحصول على إرتباط أعظمي.

من أجل التطبيقات الجيوديزية الدقيقة يجب أن يتمّ إشتقاق أشباه الأطوال من قياسات الطور (*Phase Observation*) للإشارات الحاملة (بأطوال موجات *19 cm, 24 cm*) بسبب الدقة الأكبر بكثير. يقوم اللاقط بقياس فرق الطور *phase difference* بين إشارة القمر الملتقطة (والتي عانت من إنزياح بسبب تأثير دوبلر *doppler effect*، فقرة *1.4.3*) وإشارة مولّدة في اللاقط. هذه الطريقة تحتاج إلى حلّ مشكلة الغموض *Ambiguity* (فقرة *4.9.3*).

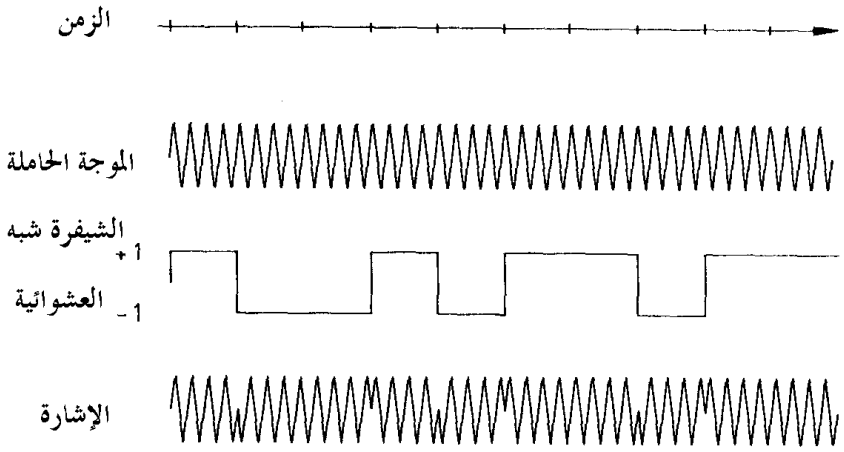
النوع الثالث من الإشارات المبثوثة بواسطة أقمار نظام ال *GPS* هي الأخبار أو المعلومات المبثوثة (*Broadcast Messages*). الخبر الواحد يتم بثه بتردد بطيء (*50 bits/sec*) ويكرر نفسه كل *30* ثانية. إن كل من جزئي الشيفرة مزود بتلك المعلومات المبثوثة. الخواص الرئيسية لأنواع الإشارات الثلاثة المستعملة في قياسات ال *GPS* (الموجة الحاملة، الكود أو الشيفرة وإشارات المعطيات أو المعلومات) موجودة في القائمة (*4.2*)

.

الساعة الذرية (سيزيوم *Cs*، روبيديوم *Rb*) التردد الأساسي	*10.23 MHz* (ميغا هيرتز)
الإشارة الحاملة L_1	*154x10.23 MHz*
التردد L_1	*1575.42 MHz*
طول الموجة L_1	*19.05 cm*
الإشارة الحاملة L_2	*120x10.23 MHz*
التردد L_2	*1227.60 MHz*
طول الموجة L_2	*24.45 cm*
تردد الشيفرة *P-Code chipping rate*	*10.23 MHz (Mbps)*
طول موجتها	*29.31 m*
طول فترتها *Period*	*266* يوم، *7* أيام لكل قمر
تردد الشيفرة *C/A-Code chipping rate*	*1.023 MHz (Mbps)*
طول موجتها	*293.1 m*
طول فترتها	*1 millsecond* ميللي ثانية
تردد إشارة المعطيات (المعلومات)	*50 bps*
طول دور الإشارة *cycle length*	*30 sec*

قائمة *4.2*: إشارات نظام ال *GPS*.

إن تكوين الإشارة يسمح بقياس كلا من الطور *Phase* وإنحراف الطور *Phase shift* (تأثير دوبلر *doppler effect*)، إضافة للقياس المباشر لزمن إنتشار الإشارة (شكل *4.7*).



شكل *4.7*: تركيب إشارات نظام ال *GPS*.

يمكن وصف الإشارة L_1 بالعلاقة التالية:

$$S_{L1}(t) = A_P P_i(t) \sin(\omega_1 t) + A_c C_i(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t) \qquad 4.1$$

حيث:

A_p: مطال الكود *P-Code*

$P_i(t)$: جزء الكود *P-Code* بقيم ± 1

$D_i(t)$: تدفق المعلومات بقيم ± 1

A_c: مطال الكود *C/A-Code*

$C_i(t)$: جزء الكود *C/A-Code* بقيم ± 1

$A.\ sin(\omega_1 t)$: الإشارة الحاملة

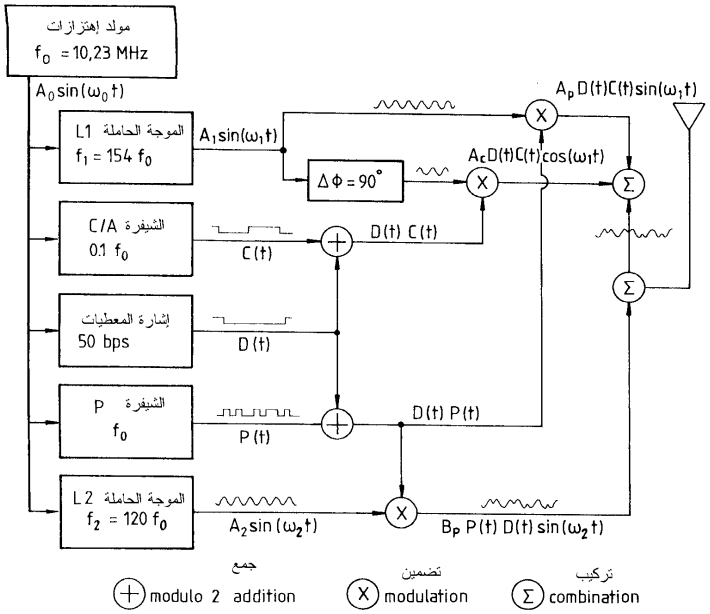
الدليل i يشير إلى القمر رقم i.

الإشارة L_2 لها تركيب أبسط لأنها لاتحتوي على شيفرة *C/A-Code*

$$S_{L2}(t) = B_P P_i(t) D_i(t) \sin(\omega_2 t) \qquad 4.2$$

هنا تعني B_P مطال الكود.

يبيّن الشكل *4.7* كيفية تركيب إشارة نظام ال *GPS* من الشيفرة *Code* والإشارة الحاملة *Carrier*، هذه الطريقة تدعى تضمين ثنائي متناوب الطور *Binary biphase modulation*، لأن الشيفرة وإشارة المعلومات تعتبر تيارات معطيات ثنائية *binary data streams*، هناك فقط إمكانيتين لتضمين الطور. إن إنتقال الشيفرة من *1-* إلى *1+* أو من *1+* إلى *1-* يسبب تغيير في الطور *phase shift* مقداره $180°$. تحمل الإشارة الأولى L_1 الشيفرتين معا. يتم تحقيق ذلك بطريقة إسمها تربيع الطور *phase quadrature*. تفصل الإشارة L_1 الأصلية ويتم تغيير الطور فيها بمقدار *90* درجة قبل إدماجها بإشارة الشيفرة *C/A-Code*، وبعدها تجمع مع إشارة الشيفرة المضمّنة *P-Code*. هذه العملية مشروحة من خلال العلاقة *4.1* والشكل *4.8*.



شكل *4.8*: إنشاء إشارة ال *GPS*.

إن طريقة التضمين الثنائي متناوب الطور *Binary biphase modulation* بواسطة مقاطع من شيفرة التشويش شبه العشوائي *PRN* تنتج عرض نطاق ترددي *Bandwhidth* (الفرق بين أعلى وأخفض تردد مستعمل في زمرة ترددات مختلفة) واسعا للإشارات الملاحية. هذه الطريقة تحدّ من تداخل الإشارات الأخرى. طيف الشيفرة *P-Code* يملك عرض نطاق ترددي قدره *20 MHz*، وهذا يوافق دقّة تبلغ *1 nanosecond* (*1* نانو ثانية= $1x10^{-9}$ ثانية) وهذا ما يوافق بالتالي *30 cm* (بإعتبار العلاقة *2.69*) في شروط جيدة (نسبة الإشارة إلى التشويش *Signal/Noise* جيدة). عرض النطاق الترددي للشيفرة الأخرى *C/A-Code* يبلغ *2 MHz*، وهذا ما يوافق تخفيضا لدقة الإشارة بمقدار عشرة أمثال.

الدخول الى الشيفرة الدقيقة *P Code* ممكن فقط للّواقط المتزامنة بشكل دقيق مع زمن النظام، والمتوضّعة في أماكن معلومة بدقة. لذلك فإن الدخول إليه يتحقق بشكل عام بواسطة الشيفرة *C/A-Code* الأقصر بكثير وذلك عن طريق المعلومة المسماة *Hand Over Word HOW* (بما معناه الكلمة الأولى أو العلوية)، وهي الكلمة التي تحوي عدد ال *Z* (*Z-Count*) وتظهر على رأس كلّ مجموعة من المعلومات المبثوثة ضمن الإشارة (فقرة *4.5.3*). عدد ال *Z* هنا يعني العدد الصحيح لفترات ال *1.5* ثانية منذ بداية أسبوع نظام ال *GPS* (*GPS week*) وبذلك يتم تمييز زمن القياس *data record* في الزمن المرجعي للنظام (*GPS time*).

4.5 *تعيين المدار وطريقة تمثيله* *Orbit Determination and Orbit Representation*

4.5.1 **تعيين التقويمات المبثوثة** *Broadcast Ephemeris*

لحلّ المهمات الملاحية، يحتاج المستخدم إلى معرفة مباشرة وفورية *real time* لمواقع الأقمار الصناعية وكذلك معلومات عن الزمن (زمن النظام). يؤمّن ذلك بواسطة معلومات المدار (أو الخبر الملاحي *Navigation Message*) الموجودة في إشارة المعطيات الإضافية المذكورة في القائمة *4.2*. تحسب هذه المعلومات الملاحية في قسم التحكّم وتبثّ إلى المستعملين عن طريق الأقمار *Satellites*.

يتمّ الحصول على التقويمات المبثوثة على مرحلتين. يتم في المرحلة الأولى حساب ما تدعى التقويمات المرجعية، وذلك إعتمادا على قياسات مدتها سبعة أيام من محطات المراقبة الخمسة بإستخدام برامج واسعة لحساب المدارات. في المرحلة الثانية، يتم حساب الفروقات بين القياسات الراهنة في محطات المراقبة والتقويمات المرجعية، وتعالج للحصول على تصحيحات للتقويمات المرجعية.

لهذا الغرض يتم قياس أشباه المسافات بإعتماد الشيفرة وقياس دوبلر(فقرة *1.4.3*) وذلك لكل الأقمار المرئية وفي كل محطات المراقبة. تصحح القياسات بسبب تأخير إنتشار الموجات عبر طبقة الإيونوسفير *Ionosphere* وطبقة التروبوسفير *Troposphere* (فقرة *2.3.2* وفقرة *4.14.4*) وكذلك بما يخص التأثيرات النسبية *relativistic effects* (فقرة *4.14.1*). تعالج هذه القياسات بعدها بواسطة برامج التصفية والتنبؤ (مثلا *Kalman Filter*) ومن ثمّ تستخدم لحساب ما يلي:

- ست عناصر مدار لكل قمر
- ثلاث وسائط ساعية لكل قمر
- ثلاث عوامل ضغط إشعاع شمسي *solar radiation pressure* لكل قمر
- وسيطين ساعيين لكل محطة مراقبة (إحدى الساعات تعتبر صحيحة خالية من الخطأ)
- عامل مقياس ناتج عن تأثير طبقة التروبوسفير *Troposphere* الجوية لكل محطة مراقبة
- ثلاث وسائط لحركة القطب.

تستخدم التشويشات *perturbations* المقدّرة لتلك العناصر لتصحيح التقويمات المرجعية للأقمار ولتشكيل التقويمات المبثوثة. يتمّ التنبؤ بطريقة مشابهة بتصرّف ساعة القمر ويرسل هذا ضمن إشارة المعلومات على شكل كثير حدود من المرتبة الثانية. يعتمد حساب مدارات الأقمار على وسائط حقل الثقالة وإحداثيات المحطات في الجملة الجيوديزية العالمية *World Geodetic System WGS 1984*. تؤخذ وسائط دوران الأرض من مؤسسات علمية دولية مثل الخدمة الدولية لدوران الأرض *International Earth Rotation Service IERS* (فقرة *4.5.2*، *4.14.3*)

4.5.2 **تقدمة المدار** *Orbit Representation*

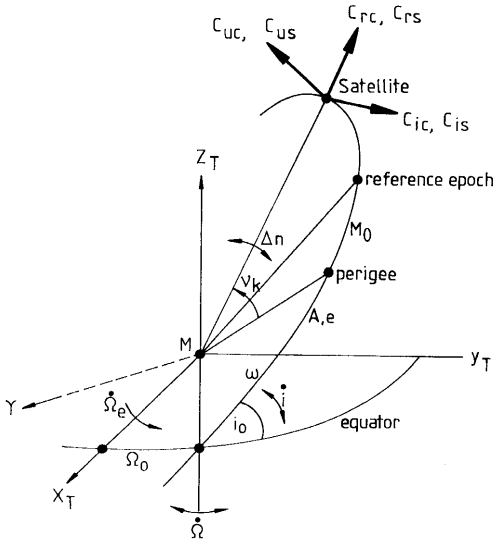
تتجسد إحداثيات الأقمار المحسوبة عن طريق البرامج المذكورة أعلاه (*kalman filter*) بعناصر كيبلر (فقرة *3.1.1*) ووسائط تصحيحية لها (فقرة *3.2*). تبين اللائحة *4.3* وسائط مدار القمر وحالة ساعته. الوسائط المذكورة تعود لنقطة زمنية مرجعية t_{0e} للتقويمات ونقطة زمنية مرجعية t_{0c} من أجل الساعة. تلك الوسائط صالحة لفترة زمنية تبلغ ساعتين قبل وساعتين بعد النقطة الزمنية المرجعية. الشكل *4.9* يوضح العناصر المحتواة في تلك التقويمات.

الوسائط الزمنية
t_{0e}: زمن مرجعي، وسائط التقويمات [ثانية]
t_{0c}: زمن مرجعي، وسائط الساعة [ثانية]
a_0, a_1, a_2: عوامل كثير حدود لتصحيحات الساعة [ثانية]
IOD: نسخة المعلومات، رقم لتعريف دفعة مجموعة المعلومات الراهنة
وسائط كيبلر للمدار *Keplerian parameter*:
$\sqrt{A}$: الجذر التربيعي لنصف المحور الكبير لمدار القمر [$m^{1/2}$]
e: لامركزية المدار [دون واحدة]
i_0: زاوية الإرتفاع *inclination* في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
Ω_0: زاوية الصعود المستقيم لعقدة الصعود *right ascension of ascending node* في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
ω: متحول نقطة الحضيض *argument of perigee* للمدار [نصف دائرة]
$\overline{M_0}$: الإنحراف الوسطي في اللحظة الزمنية المرجعية [نصف دائرة]
Perturbation parameter وسائط التصحيحات (فقرة *3.2.2*)
Δn : الفرق بين الحركة الوسطية للقمر والقيمة المحسوبة [نصف دائرة]
$\dot{\Omega}$: درجة تغيّر الصعود المستقيم [نصف دائرة/ثانية]
$\dot{i}$: درجة تغيّر زاوية الإرتفاع [نصف دائرة/ثانية]
C_{us}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لمتحول زاوية العرض *argument of latitude* [راديان]
C_{uc}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لمتحول زاوية العرض *argument of latitude* [راديان]
C_{is}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لمتحول زاوية الإرتفاع *argument of inclination* [راديان]
C_{ic}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لمتحول زاوية الإرتفاع *argument of inclination* [راديان]
C_{rs}: مطال تصحيح الحد الجيبي التوافقي *sine harmonic* لنصف قطر المدار [متر]
C_{rc}: مطال تصحيح حد التجيب التوافقي *cosine harmonic* لنصف قطر المدار [متر]

اللائحة *4.3*: عرض للتقويمات المبثوثة.

يتم، كل *60* دقيقة، إرسال مجموعة جديدة من المعطيات مسببة بذلك قفزات بين الأقسام المتداخلة. هذه الفروقات يمكن أن تصل إلى ديسيمترات قليلة، ولكن يمكن معالجتها بطرق مناسبة. تكون هذه القفزات أكبر في حال تم حساب التقويمات من معطيات مختلفة، لذلك ينصح بإستخدام أحدث تقويمات يمكن الحصول عليها.

تستخدم مجموعة الوسائط المذكورة في الجدول *4.3* لحساب زمن القمر وإحداثياته. الواحدة المسماة (نصف دائرة *semicircle*) يمكن تحويلها إلى راديان بضربها بقيمة π. المجموعة الأولى من الوسائط المذكورة تستعمل لتصحيح ساعة القمر، والمجموعة الثانية تعرّف إهليلج كيبلر في اللحظة المرجعية. المجموعة الثالثة تحوي تسعة وسائط تصحيحية متعلقة بتأثير جاذبية القمر والشمس وضغط الإشعاع الشمسي، وكذلك تأثير حركة القطب (فقرة *3.2*).



شكل *4.9*: وسائط كيبلر والتصحيحات المرسلة في التقويمات *broadcast message*.

يبين الشكل *4.9* وسائط كيبلر وعناصر التصحيحات في المعلومات المبثوثة *broadcast message*. الوسيط Ω_0 ليس مقاسا إعتبارا من نقطة الإعتدال الربيعي Υ، إنما إعتبارا من خط الزوال المرجعي X_T. لذلك فإن Ω_0 لاتمثل هنا زاوية صعود مستقيم، إنما زاوية طول.

4.5.3 حساب زمن القمر الصناعي وإحداثياته *Computation of Satellite Time and Satellite Coordinates*

يتم تمييز زمن ال *GPS* برقم الأسبوع ورقم الثواني الجارية منذ بداية الأسبوع المعتبر. لذلك يمكن أن يتراوح الزمن بين *0* في بداية الأسبوع و *604800* عند نهاية الأسبوع. إن الزمن الصفري للنظام هو نقطة بداية إعتماده، وهو يوم *5* كانون الثاني عام *1980* تمام الساعة 0^h *UTC* في مقياس الزمن الدولي (فقرة *2.2.4*). إن زمن ال *GPS* هو مقياس زمني مستمر ومعرّف بواسطة الساعة في محطة التحكم الرئيسية *MCS* (فقرة *4.3*). يجري في كل سنة تعديل مقياس الزمن الدولي *UTC* وذلك بإضافة ثانية واحدة له، ومن ناحية أخرى فإن ساعة محطة التحكم الرئيسية *MCS* لها إنحرافات دقة خاصة بها، لذلك فهذين المقياسين للزمن غير متطابقين. يتم مراقبة الفرق بين المقياسين الزمنيين بإستمرار من قبل قسم التحكم وكذلك إرساله للمستخدمين عن طريق المعلومات الملاحية. على سبيل المثال بلغ الفرق بين النظامين الزمنيين عام *1995* مقدار *10* ثواني (زمن نظام *GPS* مسبّق).

بسبب وجود أخطاء توليد الترددات الثابتة من قبل مولدات الترددات *oscillators* فإن قراءة ساعة القمر تختلف عن زمن النظام *GPS*. يتم التحكم بتصرّف ساعة القمر (*oscillator*) عن طريق قسم التحكم بواسطة التنبؤ به ككثير حدود من الدرجة الثانية، وسائطه موجودة في المجموعة الأولى من اللائحة *4.3*. يتم تصحيح زمن القمر t_{SV} بالنسبة لزمن ال *GPS*:

$$t = t_{SV} - \Delta t_{SV}$$

حيث

$$\Delta t_{SV} = a_0 + a_0 (t - t_{0c}) + a_2 (t - t_{0c})^2 \qquad 4.3$$

t_{0c}: الزمن المرجعي للعوامل a_0، a_1، a_2.

يمكن في الحسابات اللاحقة تعويض t بقيمة t_{SV} وذلك بدون خسارة بالدقة. بإشتقاق العلاقة نحصل على إنحراف ساعة القمر الصناعي *drift of satellite clock* :

$$\dot{\Delta} t_{SV} = a_1 + 2a_2 (t - t_{0c}) \qquad 4.4$$

تحسب إحداثيات القمر الصناعي X_k, Y_k, Z_k من أجل نقطة زمنية معينة t وذلك في إطار مرجعي جيومركزي مثبت بالأرض. الزمن t_k المنقضي منذ النقطة الزمنية المرجعية t_{0e} يساوي:

$$t_k = t - t_{0e} \qquad 4.5$$

يجب أخذ حالة عبور بداية إسبوع جديد بعين الإعتبار. وكذلك تصح العلاقات التالية:

نصف المحور الكبير لمدار القمر $$A = \left(\sqrt{A}\right)^2 \qquad 4.6$$

الحركة الوسطية المحسوبة $$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{A^3}} \qquad 4.7$$

الحركة الوسطية المصححة $$n = n_0 + \Delta n \qquad 4.8$$

الإنحراف الوسطي $$\overline{M_k} = \overline{M_0} + n.t_k \qquad 4.9$$

معادلة كيبلر للإنحراف الوسطي $$E_k = \overline{M_k} + e.sin\ E_k \qquad 4.10$$

تحلّ هذه المعادلة بالتقريب المتتالي. يكفي عادة تقريبين لأن لامركزية المدار صغيرة ($e \le 0.001$):

$$E_0 = \overline{M} \qquad E_i = \overline{M} + e.sin\ E_{i-1}. \qquad 4.11$$

الثابتة الثقالية في جملة *WGS84*:

$$GM = 3{,}986005 \cdot 10^{14}\ m^3/s^2. \qquad 4.12$$

وسرعة دوران الأرض في جملة *WGS84*:

$$\omega_e = 7{,}292115.10^{-5}\ rad/s \qquad 4.13$$

تستخدم العلاقات التالية في الحسابات اللاحقة للإحداثيات

الإنحراف الحقيقي $$cos\ \nu_k = \frac{cos\ E_k - e}{1 - e.cos\ E_k} \qquad 4.14$$

$$sin\ \nu_k = \frac{\sqrt{1-e^2}\ sin\ E_k}{1 - e.cos\ E_k}$$

دليل زاوية العرض $$\Omega_k = \nu_k + \omega \qquad 4.15$$

تصحيح زاوية العرض $$\delta u_k = C_{uc}\ cos\ 2\Phi_k + C_{us}\ sin\ 2\Phi_k \qquad 4.16$$

تصحيح القطر $$\delta r_k = C_{rc}\ cos\ 2\Phi_k + C_{rs}\ sin\ 2\Phi_k \qquad 4.17$$

تصحيح زاوية الإرتفاع $$\delta i_k = C_{ic}\ cos\ 2\Phi_k + C_{is}\ sin\ 2\Phi_k \qquad 4.18$$

الدليل المصحح $$U_k = \Phi_k + \delta u_k \qquad 4.19$$

القطر المصحح $$r_k = A(1 - e\cos E_k) + \delta r_k \qquad 4.20$$

زاوية الإرتفاع المصححة $$i_k = i_0 + \dot{i}\,t_k + \delta i_k \qquad 4.21$$

الإحداثيات في مستوي المدار $$X_k' = r_k \cos u_k \quad Y_k' = r_k \sin u_k \qquad 4.22$$

زاوية الطول المصححة للصعود المستقيم $$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e).t_k - \dot{\Omega}_e.t_{0e} \qquad 4.23$$

إحداثيات القمر الجيومركزية

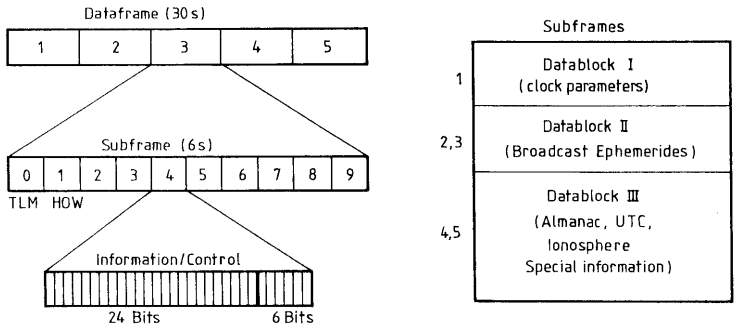
$$X_k = X_k' \cos\Omega_k - Y_k' \sin\Omega_k \cos_k$$

$$Y_k = X_k' \sin\Omega_k + Y_k' \cos\Omega_k \cos i_k \qquad 4.24$$

$$Z_k = Y_k' \sin i_k$$

4.5.4 **تكوين إشارة المعلومات الملاحية** *Structure of the GPS Navigation Data*

وتدعى أيضا بالخبر الملاحي وهو مركّب كما في الشكل *4.10*. على المستخدم أن يحلّ شيفرة إشارة المعلومات ليمكنه الدخول إلى المعلومات الملاحية. للأغراض الملاحية الآنيّة *on-line*، يتم حل هذه الشيفرة بواسطة معالج *processor* (كومبيوتر) داخل الجهاز. يؤمّن أغلب منتجي اللواقط برامجا لحل الشيفرات في المكتب بعد نقل القياسات من اللاقط إلى الكومبيوتر.



شكل *4.10*: تكوين إشارة المعلومات الملاحية *Structure of the GPS Navigation Data*.

بتردده البطيء (*50 bit/sec*) وتكراره لنفسه كل *30* ثانية فإن محتوى المعلومات الملاحية كاملا يساوي *(50x30=1500 bit)*. إن إطار المعطيات الكامل مقسّم إلى خمس إطارات ثانوية ذات فترة *(30/5=6)* ثواني (كل واحدة توافق *1500/5=300 bits*)، كل إطار ثانوي يحتوي على عشرة كلمات، الواحدة منها تشكّل من *30 bits*، ستة من تلك الثلاثين *bit* هي للتدقيق (شكل *4.10*). الكلمتين الأوليتين من كل إطار ثانوي هما كلمة الإرسال *telemetry word TLM* والكلمة الأولى *Hand Over Word HOW* لشيفرتي *C/A-P-Code*. كلمة الإرسال *TLM* تحوي طريقة (تزامن *synchronization pattern*) لتسهيل الدخول الى المعطيات الملاحية.

توزّع المعلومات على ثلاث مجموعات كالتالي:

المجموعة الأولى: تظهر بالإطار الأول وتحوي وسائط الساعة،

المجموعة الثانية: تظهر في الإطارين الثاني والثالث وتحوي الوسائط اللازمة لحساب إحداثيات القمر،

المجموعة الثالثة: تظهر في الإطارين الرابع والخامس وتحوي التقويمات ووسائط الساعات لكلّ أقمار النظام، كما تحوي أيضا وسائط تصحيحات طبقة الإيونوسفير *ionosphere* ...إلخ .

خلافا للإطارين الأول والثاني فإن الإطارين الرابع والخامس لايتكرّران كلّ *30* ثانية. الإطاران يتألفان من *25* صفحة تظهر بالتتابع بحيث أن محتوى المعلومات يبثّ كاملا خلال *12,5* دقيقة (*25x30s/60*). كلّ صفحة تحوي حالة قمر واحد من أقمار النظام (تقويماته الخاصة به، تصحيحات ساعته،رمزه الخاص به، حالة صحته اللحظية *health status*). هذه المعلومات القليلة الدقة تفيد لإلقاء نظرة على توزّع الأقمار في المجموعة وفحص الإشارات الملاحية للأقمار.

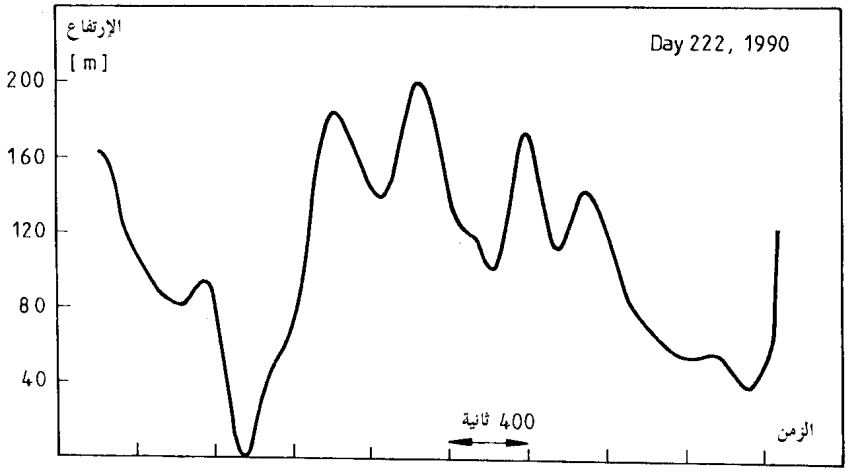
4.6 الحد من دقة النظام *International Limitation of the System Accuracy*

إن نظام التوضع العالمي *GPS* هو نظام ملاحي عسكري تحت مسؤولية قسم الدفاع الأمريكي *U.S. Departement of Defence DoD*، وبناء عليه يجب أن يحقق أغراضا أمنية أمريكية. لذلك فقد أعلن منذ البداية بأن المستخدمين المدنيين للنظام سوف يتمتعون فقط بدقة محدودة للنظام. الخدمة المهيأة للمستخدمين المدنيين تدعى خدمة التوضع النظامية *Standard Positioning Service SPS*، بينما الخدمة المهيأة للمستخدمين أصحاب الترخيص (غالبا العسكريين) تدعى خدمة التوضع الدقيقة *Precise Positioning Service PPS*. تبلغ دقة التوضع المعياري حاليا *100 m 2D rms*، وهذا يعني دقّة موضع أفقية (أو ثنائية الأبعاد) هي مائة متر أو أفضل لمستعمل وحيد وذلك *95%* من الزمن (فقرة *4.14.2*). الخدمة الدقيقة تؤمن *10-20 m* (بأبعاد ثلاث).

هناك طريقتين لتحقيق تحديد الدقة المذكور *limitation of accuracy*، وهما طريقة تدعى ضد التشويش *Anti Spoofing AS* وطريقة تدعى قابلية الإنتخاب *Selective Availability SA*. الطريقة الأولى تتضمن تشويش مقصود للشيفرة الدقيقة *P-Code* حيث تسمى عندها الشيفرة المحمية *Y-Code*. يزوّد المستعملون أصحاب الترخيص فقط بوسيلة الدخول إلى الشيفرة الدقيقة. طريقة القابلية الإنتخابية *SA* تتضمن شقّين للحد من المعطيات:

- تغيير معطيات التقويمات
- العمل على عدم توازن ساعة القمر.

كلا الطريقتان تنتجان أخطاء في أشباه الأطوال المقاسة. الشكل *4.11* يبين أن الحد من الدقة بواسطة القابلية الإنتخابية *SA* يتضمن مركبات متغيرة ببطء وبسرعة.



شكل *4.11*: تأثير القابلية الإنتخابية (لاقط ثابت).

تم تشغيل *SA* لأول مرة يوم *23* آذار *1990* ولكن توقف العمل به بتاريخ *2* آب *1990* بسبب أزمة الخليج الثانية. ودخلت الطريقة الخدمة المنتظمة إعتبارا من تشرين الثاني *1991*. بدأ العمل بطريقة ضد التشويش *AS* رسميا منذ إعلان حالة التشغيل الكاملة للنظام يوم *1* كانون الثاني *1994* (*21* قمر من النمط *II* متواجدون في مداراتهم).

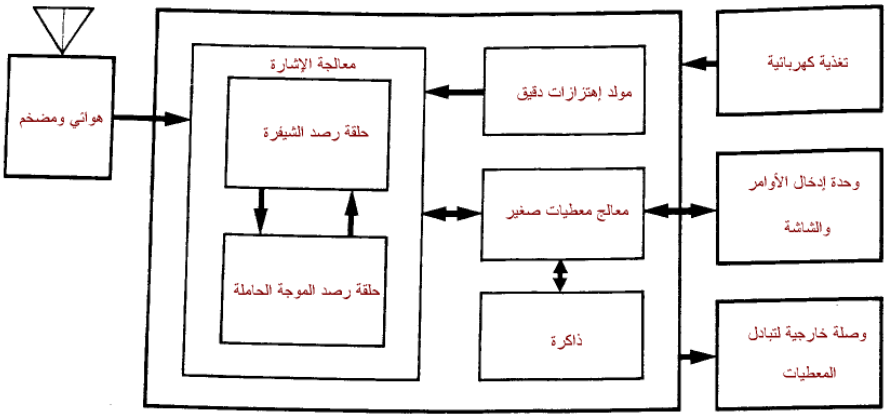
يمثل توزّع الأقمار الحالي المرحلة النهائية من تشكّل المجموعة الهندسي والتي تتكون من *24* قمرا في *6* مستويات تؤمّن تغطية ثلاثية الأبعاد بدون مناطق دقة منخفضة في العالم. يمكن الحصول على معلومات عن حالة النظام من مصادر مختلفة عامة وتجارية. حرس الشواطئ الأمريكي مثلا *U.S. Coast Gaurd* مسؤول عن وضع هذه المعلومات تحت تصرف المستخدمين المدنيين.

4.7 لواقط نظام ال GPS (قسم المستخدم)

إن نظام ال *GPS* هو حديث، لذلك فإن لواقط إشاراته تتطور بسرعة. في هذه الفقرة سوف يتم شرح المبدأ الرئيسي لتصميم اللاقط، وبعدها يتم عرض بعض نماذج اللواقط الكثيرة المتواجدة في الأسواق للأغراض الجيوديزية والمساحية والملاحية.

4.7.1 مفاهيم اللاقط ومركباته الأساسية *Receiver Concepts and Receiver Components*

المركّبات الأساسية للاقط ال *GPS* (شكل *4.12*):



شكل *4.12*: المركبات الأساسية للالقاط.

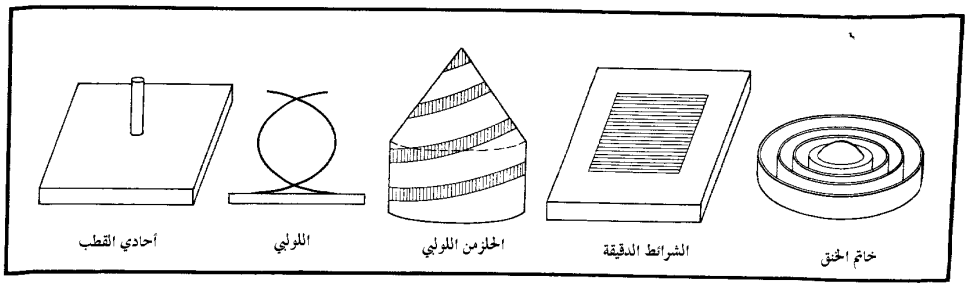
- هوائي مع مضخّم إشارة
- وحدة التردّد الراديوي مع التعرّف على الإشارة ومعالجتها (القنوات)
- مولّد ترددات دقيق (ساعة ذرية)
- وحدة تأمين طاقة (كهربائية)
- وحدة تدخّل المستخدم (إعطاء أوامر وشاشة)
- وحدة ذاكرة وتخزين القياسات.

يكتشف الهوائي الموجة الإلكترومغناطيسية الواصلة من القمر الصناعي، يحوّل طاقة الإشارة إلى تيار كهربائي، يضخّم قوة الإشارة ويوصلها إلى القسم الإلكتروني للالقاط (وحدة التردد الراديوي). يجب أن يكون الهوائي حساس جدا لإشارات القمر الضعيفة، ويجب أن تؤمّن طريقة الإلتقاط إلتقاطا لإشارات من كلّ الإتجاهات الممكنة في نصف الكرة السماوية المرئي (مختلف زوايا السموت والإرتفاعات). متطلبات إضافية للّواقط المستعملة لأغراض جيوديزية دقيقة هي توازن وثبات عالي لمركز الطورالكهربائي *antenna phase center* في الهوائي (فقرة *4.14.5*)، وحماية ضد ظاهرة تعدد طرق الإشارة الملتقطة *mulipath* (فقرة *4.14.4.3*). يطلب في التطبيقات الملاحية (جوية وبحرية) إلتقاط الموجات القادمة من مستو أدنى من المستوي الأفقي للهوائي، بينما يتم في التطبيقات الجيوديزية، في أغلب الأحيان، إهمال الإشارات ذات الإرتفاع الأقل من *10* درجات.

هناك عدة أنواع من هوائيات اللواقط المتوفرة في الأسواق (شكل *4.13*):

- ذو القطب الواحد أو ثنائي القطب *monopole or dipole*
- الحلزون التربيعي *quadrifilar*
- الحلزون اللولبي *spiral helix*
- الشرائط الدقيقة *microstrip*
- خاتم الخنق *choke ring* (مصمّم لتجنّب ظاهرة تعدد طرق الإشارة *mulipath*)

يستعمل نموذج الشرائط الدقيقة *microstrip* بشكل واسع لسهولة صناعته ويمتاز بقلّة سماكته ليجد إستعمالا أكبر في التطبيقات الجوية (سهولة تركيبه في الطائرات) وكذلك يتوافق مع المتطلبات المتزايدة للحصول على أجهزة *GPS* صغيرة الحجم، وبشكل خاص عندما يكون الهوائي واللاقط مبنيان بنفس الوحدة. الهوائيات الجيوديزية (المستعملة في التطبيقات الجيوديزية) تصمّم لإستقبال الترددين الحاملين L_1, L_2. يتم حمايتهم من ظاهرة تعدد طرق الإشارة *mulipath* بواسطة صفيحة إضافية أو بإستعمال (خاتم الخنق *choke ring*).



شكل *4.13*: نماذج هوائيات لواقط نظام ال *GPS*.

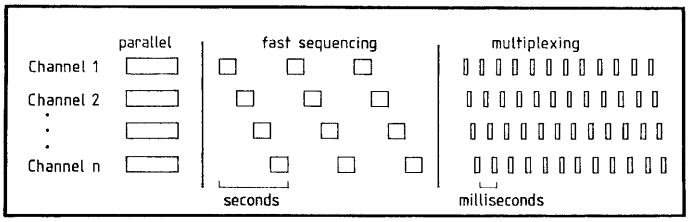
تحوّل إشارة القمر الواصلة إلى تردد منخفض في وحدة التردد الراديوي *Radio Frequency* وتعالج خلال قناة أو عدة قنوات. يمكن إعتبار قناة اللاقط الوحدة الإلكترونية الرئيسية في اللاقط. سوف يتم شرح معالجة الإشارة في الفقرة *4.7.2*.

يمكن أن يملك اللاقط قناة واحدة أو عدّة قنوات. في طريقة تصميم القنوات المتوازية *parallel channel concept* ترصد كلّ قناة قمرا صناعيا معينا. لتعيين ثلاث مركبات إحداثية وزمن، يجب أن يتوفر على الأقل أربع قنوات متوازية. بإستخدام قنوات إضافية يتمّ رصد أقمار إضافية. اللواقط الحديثة تحوي *12* قناة لكلّ تردّد.

في طريقة تصميم القناة التبادلية *sequencing channel* تبدّل القناة من قمر لآخر بفاصل زمني منتظم. لاقط ذو قناة واحدة يجب أن يبدّل على الأقل لأربعة أقمار لتعيين ثلاثة إحداثيات (ثلاثية الأبعاد). يجب أن يتزامن تردّد عملية التبديل *sequencing rate* مع تردّد إشارة المعطيات *data rate*، ولذلك فإنّ إشارة المعلومات لا يتمّ إلتقاطها بشكل كامل إلا بعد عدة تبديلات. يحتاج اللاقط أربعة مرات *30* ثانية على الأقل قبل أن يتم الحصول على أوّل موقع للاقط. تملك بعض نماذج اللواقط قناة خاصة لإستقبال وقراءة إشارة المعلومات (فقرة *4.5.4*). في أغلب الحالات يبلغ تردّد التغيير، في قنوات التغيير السريع *fast sequencing channels*، *1* ثانية لكل قمر. تستطيع القنوات عادة أن تحصل على طور الموجة الحاملة *carrier phase* عندما تعود لرصد القمر نفسه. يمكن أن توجد صعوبات في هذا المجال في التطبيقات الحركية *kinematic* وبشكل خاص بتسارعات عالية.

طريقة أخرى لمعالجة الإشارة هي طريقة الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplex*. هنا تبدّل قناة اللاقط بين أقمار مختلفة بسرعة عالية، وفي بعض الحالات لكلا الترددين. تكون نسبة تكرار التبديل *switching rate* متزامنة مع المعلومة الملاحية، أي *50 bit* في الثانية أو *20* ميللي ثانية لكل *bit*. مجموعة كاملة بأربعة أقمار تنتهي بعد *20* ميللي ثانية، أو بعد *40* ميللي ثانية من أجل اللواقط ذات الترددين (مثلا *TI4100*). يتمّ إستقبال المعلومة الملاحية بشكل متواصل، لذلك فإن أول قيمة لموقع اللاقط تحسب بعد *30* ثانية. تكون قياسات طور الموجة الحاملة متواصلة حتى في تسارعات عالية. تستعمل، بشكل جوهري، قناة وحيدة للحصول على قياسات شبه متزامنة لكلّ الأقمار. إحدى فوائد طريقة الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplex*، بالمقارنة مع طريقة القنوات المتوازية *parallel channel concept*، أنّ زمن التأخير المتعلق بأجهزة اللاقط *interchannel biases* لايلعب دورا.

إنّ القنوات المتوازية للرّصد المتواصل أرخص، وتعطي إمكانية أكبر للاقط، حيث أنها تؤمّن حساسية كبيرة للإشارة وتدعم الحصول على قياسات شيفرة *Code* مفلترة *smoothed* بمساعدة الموجة الحاملة. نظرا للإنخفاض السريع للأسعار فإنّ تركيب اللواقط في المستقبل سوف يستند بشكل أساسي على طريقة القنوات المتعددة. الشكل *4.14* يبيّن نظرة عامة على التصميمات المختلفة لإنشاء القنوات.



شكل *4.14*: تصميمات مختلفة لقنوات لاقط ال *GPS*.

المعالج الدقيق *microprocessor* ضروري لقيادة عملية الإستقبال في اللاقط، متضمّنا إستقبال الإشارة، معالجتها، وفكّ شيفرة المعلومات المبثوثة. إمكانيات إضافية للمعالج الدقيق هي الحساب الفوري *on line* للمواضع والسرعات، وتحويلها إلى جملة محلية، أو تعيين معلومات لنقاط الطريق *waypoint* (في الملاحة).

مولّد الترددات *oscillator* يولّد التردّد المرجعي في اللاقط (فقرة *2.2.5*). يكفي بشكل عام مولد ترددات عادي ورخيص نسبيا (من الكوارتز) لأن معلومات الساعة الدقيقة يتم الحصول عليها من القمر، وكذلك أخطاء ساعة المستعمل (اللواقط) تحذف بعمليات الطرح بين القياسات عندما تكون كل القياسات، في اللواقط المشاركة بحملة القياسات، متزامنة (مسجلة بنفس النقطة الزمنية). في حالة الملاحة بوجود قمرين أو ثلاثة فقط فيلزم هنا مولّد ترددات خارجي (بشكل عام فإن مولد ترددات دقيق جدا، من الروبيديوم مثلا *rubidium frequency standard*، يمكن أن يقوم مقام قمر صناعي في عملية الحل). تسمح بعض أنواع اللواقط بإستعمال مولّد ترددات مستقل يمكن وصله إليها.

كانت التغذية الكهربائية للّواقط تشكّل مشكلة كبيرة في الأجيال المبكّرة من اللواقط. حاليا تصمّم اللواقط لإستهلاك كهربائي طفيف قدر الإمكان. تحوي أغلب اللواقط على بطاريات داخلية قابلة للشحن إضافة إلى إمكانية التغذية الكهربائية الخارجية. تكفي البطارية الداخلية للعمل لفترة يمكن أن تصل لغاية أسبوع كامل وذلك حسب تواتر تسجيل القياسات المرغوب *observation rate*.

من أجل المعالجة اللاحقة للمعطيات يجب أن تخزّن القياسات والمعطيات الملتقطة في ذاكرة داخلية أو خارجية. المعالجة اللاحقة للمعطيات ضرورية في حالات القياسات على عدة محطات في حملة قياسات واحدة (التطبيقات الجيوديزية والمساحية). يتم تسجيل كل من أشباه المسافات، حالة الطور، المعلومات الملاحية والزمنية. يمكن أن تكون كمية المعطيات المسجّلة كبيرة وذلك حسب تواتر التسجيل المبرمج من قبل المستعمل. بوجود ستة أقمار، على سبيل المثال، وبإعتبار تواتر التسجيل *1* ثانية (كل ثانية يتم تسجيل مجموعة من المعطيات) نحصل على كمية معطيات مسجلة بمقدار *1.5 Mbyte* بالساعة في لاقط ذو ترددين. تحوي بعض اللواقط الحديثة ذواكر داخلية ذات سعة *5 Mb* أو أكثر. وبعض اللواقط تخزّن القياسات على شريط مغناطيسي. كما يمكن بشكل عام تسجيل القياسات مباشرة إلى كومبيوتر صغير *laptop* (القرص الثابت أو المتحرك) موصول إلى اللاقط أثناء القياسات بوصلة من نموذج *RS 232* أو ما يعادلها.

تحوي أكثر اللواقط الحديثة لوحة مفاتيح وشاشة صغيرة لتأمين الإتصال المتبادل بين المستخدم واللاقط. تستخدم لوحة المفاتيح لإدخال أوامر، ومعطيات خارجية مثل رقم محطة قياس وإرتفاع الهوائي عن إشارة الرصد المعتمدة أو لإختيار أوامر مسبقة مقترحة من الجهاز. تظهر الشاشة إحداثيات محسوبة، أقمار مرئية، دلائل على نوعية القياسات ومعلومات أخرى. تطورت برامج التشغيل بسرعة وصارت حاليا سهلة الإستعمال *user friendly* حيث تقود المستخدم عبر إختيارات مختلفة على مدار البرنامج.

يمكن تصنيف لواقط نظام ال *GPS* لعدة أنواع حسب مقاييس مختلفة:

- لواقط مرتبطة بالشيفرة *code dependent receivers*

- لواقط بدون شيفرة *code-free receivers*

كلا الطريقتين موجودتان حاليا في اللواقط الحديثة.

تصنّف أيضا اللواقط على أساس نوع القياسات الممكن الحصول عليها:

- شيفرة نظامية *C/A-code*
- شيفرة نظامية *C/A-code* + طور الموجة الأولى L_1
- شيفرة نظامية *C/A-code* + طور الموجة الأولى L_1 + طور الموجة الثانية L_2
- طور الموجة الأولى L_1 (نادرة الإستعمال)
- طور الموجتين الأولى والثانية L_1,L_2 (نادرة الإستعمال)

تصنيف آخر حسب إنشاء لقنوات اللاقط:

- لواقط متعددة القنوات *multi channel receivers*
- لواقط تبديلية *sequential receivers*
- لواقط ذات الإستقبال المتعدّد المتقابل *multiplexing receivers*

وأخيرا هناك تصنيف حسب المستخدمين:

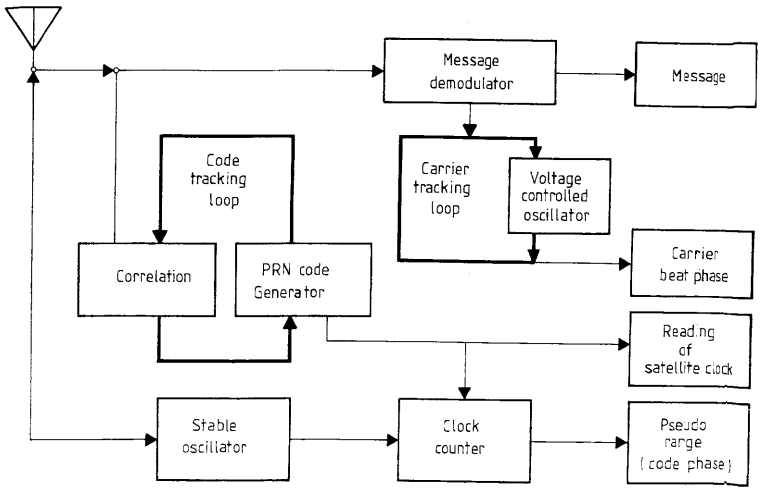
- لواقط عسكرية *military receivers*
- لواقط مدنية *civilian receivers*
- لواقط ملاحية *navigation receivers*
- لواقط زمنية *time receivers*
- لواقط جيوديزية *geodetic receivers*.

من الأمور الجوهرية في التطبيقات الجيوديزية هي إستخدام قياسات أطوار الموجات الحاملة *carrier phases* للترددين معا وإمكانية الدخول إلى الشيفرة الدقيقة (على الأقل من أجل المسافات الكبيرة أو في المناطق الجغرافية ذات التغيرات الإيونوسفيرية *ionospheric disturbances* العالية، أي زوايا العرض الجغرافي العليا والدنيا، *4.14.4.1*).

4.7.2 **معالجة الإشارة المتعلقة بالشيفرة** *Code Dependent Signal Processing*

إن شبه المسافة المشتقّ من قياسات الشيفرة هو القياس الأساسي في قناة اللاقط المرتبط بالشيفرة. تتمّ مقارنة موضع الطور لجزء الشيفرة الملتقطة مع طور نسخة موافقة لهذا الجزء. يتمّ توليد هذه النسخة داخل اللاقط. تتمّ المقارنة بواسطة طريقة الإرتباط *correlation technique*. لذلك يمكن أن يدعى القياس بطور الشيفرة *code phse*. يجب أن يملك الراصد معرفة مبدئية مسبقة للشيفرة، هذا يعني أن الشيفرة يجب أن تولّد داخل قناة اللاقط بإستخدام نفس الطريقة المستخدمة في القمر الصناعي. تتمّ عملية الإرتباط بين جزئي الشيفرتين الملتقطة والمولّدة في الجهاز (فقرة *4.4*).

تحدث هذه العملية في واحدة من حلقات الرصد في اللاقط وهي حلقة رصد الشيفرة *code tracking loop* (شكل *4.15*). الزمن اللازم لتوافق جزئي الشيفرة مع بعضهما (التأخير الزمني *time delay*) يوافق زمن إنتشار الإشارة من القمر إلى اللاقط. إن جزء الشيفرة هو بشكل أساسي تابع للزمن، لذلك فهو يؤمّن لنا قراءة ساعة القمر لحظة مغادرته القمر (في النقطة الزمنية التي غادرت بها *bit* معينة القمر، يمكن إعتبار ال *bit* كقفزة من *1-* إلى *1+* أو من *0* إلى *1* أو العكس). يحوّل التأخير الزمني إلى مسافة بإستعمال سرعة إنتشار الضوء (سرعة إنتشار الموجات الإلكترومغناطيسية في الفراغ، علاقة *2.69*). تشتقّ أشباه الأطوال إما من الشيفرة الدقيقة أو النظامية.



شكل *4.15*: تصميم مبسط لقناة ترابط الشيفرة *Code correlation channel*.

الحلقة الأخرى في مرحلة معالجة الإشارة هي حلقة رصد الموجة الحاملة *carrier tracking loop*. هنا يتم فصل الشيفرة عن الموجة الحاملة ليصبح بالإمكان قياس الأطوار، كما يتم إستخلاص المعلومات المحمّلة على الإشارة. تدعى هذه الطريقة أيضا إعادة إنشاء الموجة الحاملة *reconstruction of the carrier*. في تلك الحلقة يتم مقارنة إشارة طور الموجة الحاملة المحلّلة القادمة من القمر مع إشارة طور مولّد الترددات في اللاقط. القيمة المقاسة هي فرق الطور للموجة الحاملة *carrier beat phase* (الطور النسبي بين الإشارة الحاملة الملتقطة والإشارة الحاملة المولدة داخليا بواسطة مولد الترددات في اللاقط).

إن قناة إرتباط كاملة متعلقة بالشيفرة تنتج انواع القياسات التالية:

- طور الشيفرة *Code phase*
- طور الموجة الحاملة *Carrier phase*
- تغيّر طور الموجة الحاملة (تردد دوبلر *Doppler frequency*)
- إشارة المعلومات *Satellite message*.

إن طريقة الإرتباط *correlation technique* وطريقة إعادة إنشاء الموجة الحاملة *reconstruction of the carrier* تعملان فقط على التردد الثاني L_2 في حال كون الشيفرة الدقيقة موجودة (*AS* غير فعّالة)، أو لدى مستعملين أصحاب ترخيص للدخول إلى الشيفرة الجديدة *Y-Code* (فقرة *4.6*).

4.7.3 معالجة الإشارة بدون شيفرة *Code-less Signal Processing*

هنا تستخرج قنوات اللاقط إشارة القمر الصناعي دون معرفة الشيفرة. الفائدة من هذا التصميم هو عدم التأثر بعمليات ترميز الشيفرة من قبل قسم التحكم بالنظام في المستقبل (فقرة *4.6*). ولكن بالمقابل لايمكن إستخلاص التقويمات المبثوثة ولا المعلومات الملاحية ولا معلومات دقيقة عن الزمن. ولذلك يحتاج المرء عندئذ إلى مصادر أخرى للتمكّن بالقيام بالتخطيط المسبق لمهمات القياسات ومعالجة المعطيات. ويجب أن تتم عملية تزامن اللواقط عديمة الشيفرة المشاركة في القياسات قبل البدء بالقياس.

لقد ضمنت الحكومة الأمريكية الشيفرة النظامية لكل المستخدمين المدنيين (طبعا تحت تأثير قابلية الإنتخاب *SA*)، لذلك فقد توقف إنتاج اللواقط عديمة الشيفرة حاليا. تبقى الطريقة مهمة للمنتجين للدخول إلى الإشارة الثانية بعد ترميز (حماية) الشيفرة الدقيقة.

تدعى الطريقة المتّبعة في اللواقط عديمة الشيفرة بطريقة الجداء أو التربيع *squaring technique*. قناة التربيع تضرب إشارة القمر القادمة بنفسها وتنتج نسخة أخرى موافقة للموجة الحاملة الأصلية (شكل *4.16*). الشيفرة والمعلومات المبثوثة تسقط خارجا خلال هذه العملية. إن جداء قسم الشيفرة في المعادلة *4.2*

$$x = P(t)\sin(\omega t) \qquad 4.25$$

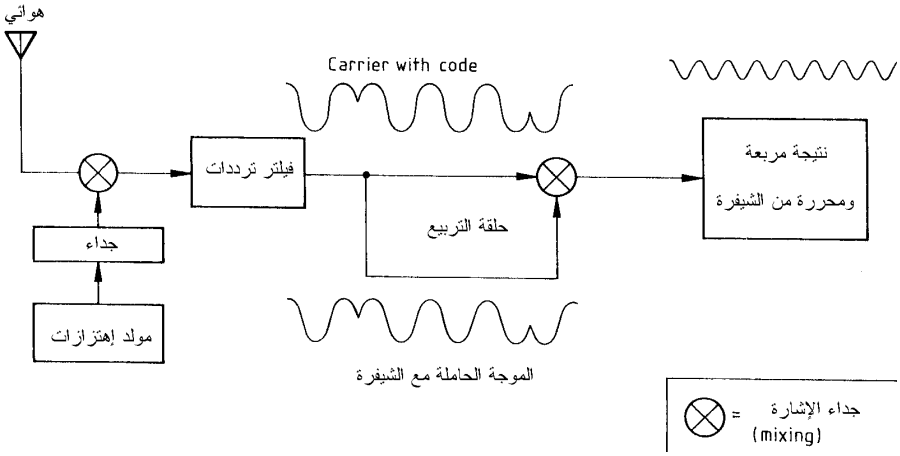
يعطي:

$$x^2 = P(t)^2 \sin(\omega\ t)^2 = P^2\left(1-\cos 2\omega t\right)/2 \qquad 4.26$$

بإعتبار أن $P(t)$ هو مجموعة من $+1$ و-1 ، مشكّلا الشيفرة، فهذا يقود إلى أن $P(t)^2=P^2$ يساوي مجموعة من $+1$ ولذلك يختفي من العلاقة *4.26*.

بواسطة x^2 يتم الحصول على إشارة حاملة صافية، ذات طور مساوي لطور الموجة الحاملة الأصلية ولكن بتردد مساوي لضعف تردد الموجة الأصلية. في هذا الإجراء تنقص أيضا نسبة الإشارة إلى التشويش *Signal/Noise ratio*. ومنه فإن طريقة الجداء لها المساوئ التالية:

- طول الموجة ينقسم إلى النصف
- نسبة الإشارة إلى التشويش تصبح أسوأ.



شكل *4.16*: تصميم طريقة الجداء.

تم إستعمال الطريقة لأول مرة في لاقط *Mactrometer*. تستخدم حاليا طرق من نفس النموذج في اللواقط ذات الترددين لقياس طور الموجة الحاملة على الموجة الثانية L_2.

إضافة للطرق المذكورة فإن هناك طرق أخرى تم إستعمالها في سياق تطور صناعة اللواقط، منها مثلا طريقة مبدأ التداخل المتخذة من طريقة تداخل القواعد الطويلة جدا *Very Long Baseline Interferometry VLBI* (فقرة *1.4.1*).

بالإستفادة من الخبرات السابقة تم تطوير طرق حديثة لإستعمال الإشارة الثانية رغم تشويشها المتعمّد من خلال عملية *AS*. هذه الطرق ليست مستقلة عن الشيفرة بشكل كامل، ولكنها تستخدم الشيفرة النظامية *C/A-code* على الإشارة L_1 لإضافة حلقة رصد الإشارة الثانية L_2 مع الإستفادة من كون كلا الإشارتين تملكان نفس الشيفرة (المضمّنة والمشوشة) *P-code*. كنتيجة لذلك يتم الحصول على قياسات الشيفرة وطور الموجة الحاملة لكل من الإشارتين، وذلك حتى تحت تأثير عملية ال *AS*. يستخدم بعض مصنّعو اللواقط طرقا مركّبة من عدة طرق بهدف الحصول على قياسات دقيقة وقابلة للإستعمال.

4.7.4 **بعض نماذج اللواقط** *Examples of GPS Receievrs*

بإعتبار أن سوق لواقط الأقمار الصناعية يتطور بسرعة كبيرة، سوف يتم هنا ذكر أهم النماذج التي لعبت وتلعب دورا هاما في التطبيقات المختلفة.

– اللواقط التقليدية

هذه اللواقط أثّرت في تطور الطرق الجيوديزية في ال *GPS* وهما لاقط *TI4100* و *Macrometer* (أول لاقط صنع لأغراض جيوديزية). يذكر هنا الجهاز الأول:

أستخدم جهاز تكساس الملاح *Texas Instrument GPS Navigator* لاقط *TI4100* لأول مرة في عام *1984* وكان أول لاقط *GPS* يؤمن كافة القياسات المهمة بالنسبة للجيوديزيين والمساحين والملاحين، وهو عبارة عن لاقط ثنائي التردد ذو إستقبال متعدّد متقابل *muliplexing receiver*. يسجّل الجهاز أنواع القياسات التالية:

– أشباه المسافات بواسطة الشيفرة الدقيقة *P-code* وعلى كلا الترددين L_1, L_2

– أشباه المسافات بواسطة الشيفرة النظامية *C/A-code* على التردد الأول L_1

– أطوار الموجتين الحاملتين L_1 و L_2، وذلك كل ثلاث ثواني.

يتم تسجيل القياسات على شريط تسجيل في آلة تسجيل خارجية أو تحوّل مباشرة إلى كومبيوتر صغير. الإتصال بين الراصد واللاقط يتم بواسط وحدة تحكم صغيرة الحجم *control display unit CDU*. من أجل الأغراض الملاحية يؤمّن المعالج في اللاقط المواقع والسرعات في الزمن الحقيقي *real time* كل *3* ثواني. الجهاز ضخم ويمكن أن يتمّ وضعه في حقيبتين للنقل: الهوائي والمضخم (*1.7 kg*)، اللاقط والمعالج (*24 kg*)، مسجل القياسات (*7 kg*)، وحدة التحكم (*0.5 kg*). إحتياجه للطاقة كبير (*22 V-32 V DC*)، ويصل إستهلاكه إلى *90* واط أثناء فترة تشغيله. تراوحت دقّة قياساته على الشكل التالي:

0.6-1 m على الشيفرة الدقيقة *P-code*،

6-10 m على الشيفرة النظامية *C/A-code*،

2-3 mm على طور الموجة الحاملة.

تم إستخدام هذا الجهاز بشكل واسع في مشاريع علمية وتطبيقية متعددة وما زال قيد الإستعمال. العديد من النتائج المنشورة ما بين *1985* و *1991* كانت مبنية على قياسات هذا اللاقط. المساوئ الرئيسية للجهاز بالمقارنة مع الأجهزة الأحدث هي:

– حجمه الكبير

– إستهلاكه الكبير للطاقة

– صعوبة تشغيله

– محدودية رصده لأربع أقمار فقط

– دقة القياس المنخفضة للطور المقاس

– حساسية الهوائي لظاهرة تعدد طرق الإشارة *multipath* وتغيّر مركز الطور في الهوائي *phase center variation*.

يمكن أن يتم توصيل لاقطين إلى هوائي واحد بحيث أن الهوائي يمكنه رصد حتى السبعة أقمار. بعد تشغيل عملية ضد الشويش المذكورة *AS*، يمكن تشغيل اللاقط *TI4100* كلاقط ذو تردد واحد (شيفرة نظامية *C/A-code*).

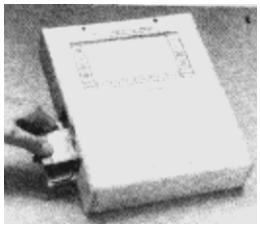
– اللواقط الحديثة

اللواقط الحالية المستعملة في الجيوديزيا والمساحة والملاحة الدقيقة تحوي أكثر أو كل الإمكانيات المذكور سابقا. بدأت أكثر النماذج تقريبا كلواقط ذات تردّد واحد وشيفرة واحدة *C/A-code* مع قابلية رصد أكثر من أربعة أقمار. في مرحلة لاحقة تم إكمال بناء اللواقط لترصد التردد الآخر L_2 بإستعمال طريقة الجداء أو التربيع *squaring technique* المذكورة، وتم أيضا رفع عدد الأقمار الممكن رصدها بشكل متزامن. في مرحلة ثالثة تمت إضافة الشيفرة الدقيقة إلى التردد الثاني L_2 لإمكانية الحصول على نوعية عالية للإشارة الملتقطة وكذلك بطول موجة كامل لإشارة L_2. كمرحلة أخيرة تمّ إدخال تقنية حديثة لتخفيف تأثير عملية ضد التشويش *AS*.

في عام *1991* أنتجت شركة *Leica* لاقطا يدعى *Wild GPS System 200*. الأجزاء الداخلية تشكّل المجس ثنائي التردد *SR299 dual frequncy sensor*، ووحدة التحكم الصغيرة الحجم *CR233 GPS controler* و بطارية (نيكل–كاديميوم *NiCd*) لتسجيل القياسات. هناك بطاقة ذاكرة يتم إدخالها في مكانها الخاص في وحدة التحكم. يمكن رصد حتى تسعة أقمار بآن واحد على كلّ من الترددين. إن الشيفرة النظامية *C/A-code* تستخدم لإعادة إنشاء أطوار الموجة الأولى L_1، بينما تستخدم الشيفرة الدقيقة *P-code* لإعادة إنشاء الموجة الثانية L_2. إذا كانت الشيفرة الدقيقة معرّضة لتأثير عملية ضد التشويش *Anti Spoofing AS* (المشغّلة من قبل قسم الدفاع الأمريكي *DoD*) فإن اللاقط يغيّر طريقة معالجة الشيفرة الدقيقة بشكل آلي وذلك إلى طريقة دون إستخدام الشيفرة L_2 *Code-less*. تدعى الطريقة المتبعة هنا لمعالجة الإشارة بطريقة الجداء بمساعدة الشيفرة *code aided squaring technique*، وهذا ما أعطى تحسّنا لمستوى تشويش الإشارة *noise level* الملتقطة بمقدار *4.5* مرة.

يزن المجس ،وضمنه الهوائي من نمط الشرائط الدقيقة *microstrip*، مقدار *2.2 kg*. تقود وحدة التحكم المجسّ وتراقب القياسات وتعرض نتائجا فورية ومعلومات إضافية عن حالة القياس والأقمار وإشاراتها. تزن وحدة التحكم *1.1 kg*. تحتاج المجموعة تغذية كهربائية ذات *12 Volt*. يستهلك المجس *8.5* واط أثناء عمله.

تطور آخر في مجال اللواقط كان اللاقط *Rogue SNR-8* وما تبعه، وقد تم تطويره خصيصا للتطبيقات الجيوديناميكية لوكالة الأبحاث الفضائية الأمريكية *NASA*. إحدى أهم خواصه أن له مستوى تشويش قياسات *measurment noise* متدني جدا للشيفرة مما يعطي وسيلة جيدة لإدماج إشارات الشيفرة مع الموجات الحاملة. النماذج الحديثة من هذا اللاقط *TurboRogue SNR 8000* تكون صغيرة الحجم وسهلة الإستعمال. حجم اللاقط الأخير يبلغ *29x23x6 cm*، يزن *4 kg* ويستهلك أقل من *15* واط، ويحتوي على *8* قنوات لكل من الإشارتين ويؤمن قياسات الطور والشيفرة على كلا الإشارتين (شكل *4.17*). هناك إمكانية التغيير الآلي إلى طريقة الرصد بدون شيفرة *code-less tracking* وذلك في حال كانت الشيفرة الدقيقة متأثرة بعملية التشويش المتعمد *AS*. الحالة المسبقة التعريف في اللاقط *default* هي حالة رصد الشيفرة الدقيقة *P-code* والتي تؤمّن قياسات عالية الدقة للطور وأشباه المسافات. إنّ الرصد بدون شيفرة يعتمد على أن كل موجة تحوي نفس الشيفرة (إما الدقيقة *P-code* أو الدقيقة المحمية *Y-code*) ولذلك يمكن للإشارة الأولى L_1 أن تترابط مع الثانية L_2 (*corss-correlated*) حيث يتم الحصول على فرق القياس (L_1-L_2) وقياسات زمن تأخير الحزمة *group delay* (P_1-P_2).



شكل *4.17*: اللاقط *TurboRogue SNR 8000*.

دقة القياسات في هذا اللاقط (*random noise*):

- شبه الطول المقاس على الشيفرة الدقيقة $\leq$ *1 cm* وذلك بعد *5* دقائق قياس
- شبه الطول المقاس بدون شيفرة ~ *10 cm* وذلك بعد *5* دقائق قياس
- طور الموجة الحاملة *0.2-0.3 mm*
- طور الموجة بدون الشيفرة *0.2-0.7 mm*.

يتمتع اللاقط *TurboRogue SNR 8000* بمقدار ضئيل جدا من القياسات المفقودة (فقرة *4.10.1*) التي يتكرر حدوثها أثناء عملية القياس (*cycle slips*).

من اللواقط الجيدة الأخرى التي تستعمل بشكل واسع أيضا في التطبيقات الجيوديزية هناك سلسلة منتجات كل من *Trimble* و *Ashtech*.

– اللواقط الملاحية *navigation receivers*

يتوسع سوق اللواقط الملاحية بسرعة كبيرة. تستعمل في أغلب الحالات قناة وحيدة للشيفرة النظامية *C/A- code* والتي تعمل على مبدأ التبديل *sequencing* أو التعدد *multiplexing* (فقرة *4.1.7*). ولكن الأجهزة ذات أربع قنوات أو أكثر تلقى رواجا كبيرا. يتم في اللواقط الملاحية إشتقاق المواقع والسرعات من قياسات أشباه المسافات بواسط الشيفرة النظامية، ويتم إظهارها على شاشة اللاقط أو تحويلها إلى كومبيوتر. لايمكن الحصول عادة على القياسات الأصلية ولا على معلومات عن طور الموجة الحاملة. يمكن العمل بطريقة الملاحة التفاضلية *differential navigation* بإستخدام اللواقط الحديثة (فقرة *4.13*).

يهتم المصنّعون بإنتاج لواقط يمكن تركيبها داخل أجهزة أخرى. يجب أن يحتوي اللاقط الملاحي تغذية كهربائية، هوائي، مضخم *preamplifier*، معالج وبرامج مرافقة. أغلب اللواقط في الوقت الحالي تعطي موقع وزمن. ومنها تؤمّن قياسات طور الموجة الحاملة، مما يفتح قاعدة كبيرة للقيام بأعمال مساحية رخيصة الكلفة. نأخذ هنا أحد اللواقط الملاحية، ماجلان *Magellan 1000 PRO* على سبيل المثال. وهو لاقط وحيد القناة يرصد *3-4* أقمار بنسبة تجديد *updating rate* (للمواقع المحسوبة والمدرجة على الشاشة) *2.5 sec* وله وصلة من نموذج *RS232* (يمكن وصله مع الكومبيوتر). النماذج الأحدث منه هي سلسلة *Magellan PROMARK X* ذو عشر قنوات يمكنها رصد كل الأقمار المرئية وبنسبة تجديد *1* ثانية، ويمكنه إنجاز عملية الملاحة التفاضلية. يمكن إستعماله أيضا لإستخلاص قياسات الطور وذلك بإضافة القطعة الداخلية المناسبة لذلك (كما في النموذج *Magellan PROMARK X-CP* مثلا).

الهوائي من نوع الحلزون التربيعي *quadrifilar* مبني مع الجهاز، ويمكن إستخدام هوائي خارجي من أجل التطبيقات في العربات (سيارات، طائرات). وزنه *850 gr* يمكن تشغيله كمحطة مرجعية في عملية القياسات النسبية *DGPS* (فقرة *4.13*). هناك أيضا إمكانية معالجة القياسات لاحقا (في المكتب) *post processing*. يمكن الحصول على دقة نسبية بحدود *3-5 m*. وهذا يكفي في حالات متعددة، مثلا من أجل تعيين نقاط مرجعية للصور الجوية من الأقمار الصناعية الأخرى، أو من أجل إدخال معطيات في نظام معلومات جغرافية *Geographic Information System GIS*. وهناك أيضا إمكانية الحصول على دقة الديسمترات وذلك بإستعمال قياسات الطور *phase*.

هناك، كما تم ذكره، العديد من اللواقط الملاحية *Navigators* الأخرى في الأسواق، يذكر منها مثلا *Trimble Ensign* ذو ثلاث قنوات يرصد لغاية الثمانية أقمار (وزنه *400 g*)، ولاقط *Motorola TRAXLER* ذو القنوات الستة والذي يرصد كل الأقمار المرئية (وزنه *489 g*) واللاقط الملاحي *Garmin GPS 100 AVD* الذي يمكن أن يرصد لغاية الثمانية أقمار ويستخدم غالبا في الأجهزة العسكرية.

تذكر أحدث المنتجات في هذا المجال بمجلات إختصاصية مثل *GPS World*.

4.7.5 **نظرة عامة** *Overview and Evaluation*

تم إدراج المواصفات الرئيسية للّواقط المتعددة الأغراض المذكورة سابقا، من وجهة نظر التطبيقات الجيوديزية، في اللائحة *4.4*. أهم العوامل هي عدد الأقمار التي يمكن رصدها بآن واحد، طول موجة الإشارة الثانية L_2، درجة تشويش القياس وحالة الرصد عند تشغيل عملية ضد التشويش *Anti-Spoofing*.