

調 査

無線測位衛星システム

大森 慎吾*

(平成元年11月20日受理)

RADIO DETERMINATION SATELLITE SYSTEM

By

Shingo OHMORI

Satellite systems for mobiles such as aircraft and land vehicles have been developed in a world-wide basis to establish high quality, high speed and reliable communications. In the early 1990's, mobile satellite communications systems provide us a quick touch with others at any time and any where in the world we are.

With realizing mobile satellite communications, a new service to provide the information of location as well as conventional communication is becoming a great demand.

This paper surveyed the outline of Radio Determination Satellite System (RDSS), which are in operation and under development. The problem in frequency allocation and service definition are also described in this paper.

1. はじめに

古代人は、夜空に輝く星座を見て自分の位置と進むべき方角を知ったという。航法装置を全く持たない古代では、昼間の航行は洋上から望む地形を、夜間の航行はおそらく星を頼りにしていたことであろう。通信手段の発達した現代においても、星座を観測することにより自分の位置を知ること(天測)は緊急時の手段として航海には必須の技術である。

このように、「測位」技術は主に海上を航行する船舶の位置を知るシステムとして発達してきた。近代になり、天測に変わり電波を用いた測位システムが開発された。これは、標識となる電波の発射元を複数局設置して各局からの電波の到達時間差や位相差から位置を求める、いわゆる双曲線航法システムであり、LORAN-C (Long Range Aid to Navigation-C)、デッカ、オメガなどが良く知られ、現在でも用いられている。この他にも航空機用として利用されている VOR (VHF Omnidirectional Radio Range) や、DME (Distance Measuring Equipment) などあるが、いずれも電波源を地上に

設置した地上系無線測位システムである。本論文では衛星系の測位システムが主眼なので、これら地上系測位システムについては述べないが、LORAN-C についてはシステムの全面運用までの測位手段として用いている衛星系のシステムが多いので述べることにする。

1960年代はじめから、衛星通信の発展と共に衛星を電波源とした測位システムが研究開発され実用化されてきたが、衛星系の測位システムの場合、軍用として開発されその一部の機能が民間に開放されている例が多い。

しかし、衛星通信の発展と通信需要の多様化に伴い、測位データを情報として利用する要求が高まり、近年では単に測位機能だけでなく通信も行える通信・測位複合システムが研究開発されており、一部は民間ベースで実用化されている。

これら、電波を用いた衛星系の測位システムを総称して無線測位衛星システム (Radio Determination Satellite System) と言い、略称で RDSS とも呼ばれている。本論文では、この衛星系の無線測位システムの概要と世界の研究開発動向を述べる。

第4章で述べるように、無線通信規則上では「測位」と「通信」は別個の機能として定義され、周波数割当も

* 鹿島宇宙通信センター 第二宇宙通信研究室

異なる。本論文ではこのような制度上の問題点も明かにするが、通信と測位を複合した衛星システムも無線測位衛星システムの範ちゅうとして述べる。

特殊な衛星系の測位システムとして、COSPAS/SARSAT に代表される捜索・救難システムがある。いわゆる EPIRB (Emergency Position Indicating Radio Beacon) であるが、緊急時のみの通信であり、かつ専用に割り当てられている周波数帯は、他の目的には絶対使用できないため本論文からは除外した。

夜空に輝く星を頼りに歩みを進めた古代の人々と同様、近代において再び「星」を望んで測位するシステムが脚光を浴びていることは大変興味深い。

2. 無線測位衛星システムの概要

無線測位 (Radio Determination) とは、国際電気通信連合 (ITU) の無線通信規則第 1 条によると「電波の伝搬特性による物体の位置、速度その他の特性の決定又はこれらの諸元に関連する情報の取得」と定義されている。無線測位のうち、衛星を用いる測位は無線測位衛星業務 (Radio Determination Satellite Service) と呼ばれ、RDSS と略称されている。測位サービスを行う衛星システムを無線測位衛星システム (Radio Determination Satellite System) とよび、これを RDSS と略称する場合も多い。

無線測位は、船舶や航空機の航行のための技術として発達してきた歴史的背景があるため、航空及び海事関係では一般に、無線測位を用いた航行を電波航法 (Radio Navigation) と呼んでいる。航法 (Navigation) とは、航空機や船舶が自分で測位して航行する機能を言うが、管制塔や地上の基地局が航空機や船舶の位置を知る機能は監視 (Surveillance) と呼ばれる。典型的な監視装置としてはレーダがあげられる。この他、通常の通信 (Communication) とあわせて航空関係では各機能の英文頭文字をとって CNS という略語がしばしば用いられる。

衛星を用いた測位システムには大別して 2 種類ある。1 つは測位機能のみを有するシステム、他は測位機能と通信機能を合わせて持ったシステムである。前者のシステムが従来のいわゆる測位システムで、上記の Naviga-

tion に相当する機能である。低軌道の周回衛星を用い、ドップラー周波数偏移等から位置を求めるシステムが多い。これは、衛星側から電波を発射し、移動局で受信した後、演算処理を行って位置を決定するシステムで基本的に衛星から移動局への一方向であり、移動局側からは電波を発射しない。代表的なシステムとしては、NNSS (Navy Navigation Satellite System) や NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging/Global Positioning System) などがある。本論文ではこの受動的測位システムを無線航行衛星システム (Radio Navigation Satellite System) と呼ぶ。

後者の測位システムは、近年世界各国各機関で研究開発が進められているもので、将来全世界的なサービスが期待されている新しい衛星通信システムである。従来、「測位」は測位の機能だけを有するシステムとして、「通信」(ここで言う通信とは、いわゆる双方向の通信で音声、データ伝送等を言う。)は通信の機能だけを有するシステムとして互いに独立に開発されてきたが、これらを複合させ新たなシステムとして構築しようとするものである。前者の測位システムと異なり基本的に双方向通信の能動的測位システムで、Communication/Navigation/Surveillance を統合したシステムと言える。この通信・測位複合システムの目標は自己システム内で測位機能と通信機能を合わせ持つものであるが、システム構築の過程で他の測位システム(地上系を含む)と組合せ、測位データを情報として移動局から基地局へ送ることも考えられている。本論文ではこのシステムを通信・測位複合衛星システムと呼ぶ。

この通信・測位複合衛星システムを通信サービスとするか、測位サービスとするかは第 5 章で述べるように周波数割り当てからみた法制上の問題もあり興味深い。一般的には無線航行衛星システムと合わせ、総称して無線測位衛星システム (RDSS) と呼ばれている。後に述べる GEOSTAR に代表される通信と測位を複合したシステムのみを RDSS と称する場合があるが、これは正確ではない。

第 1 表に現在世界で運用されている RDSS システムの概略の一覧表を示す。

1989.11 (Ver. 1.2)

第1表 無線通信測位衛星システム一覽 (その1)

郵政省通信総合研究所

システム名 (運用者)	目的 サービス内容	開発・運用 計画	周波数	通信方式	測位方式 精度	衛星						移動局		備考
						軌道 個数	高度 周期	姿勢 安定	重量 寿命	搭載 時計	利用者	7/24, EIRP, 料金 その他		
NNSS (米国)	・米海軍の航法システム ・初の全天候電波 測位衛星システム ・全世界測位システム	1960.4 Transit1B 打上げ後、軍事用 として開発が進む 1967.7 受信システム 技術が民間に公開 される。	150MHz(VHF) 400MHz(UHF) (2周波数)	PSK	ドップラー 効果 50~600m (1周波) 2周波だと 倍精度	Transit 極軌道円 5~6機	約1000km 約107分	重力 傾斜	約63kg 水晶 5x10 ⁻¹² /20分	船舶 ・衛星が頭上に来 ないと思えない ・高速移動体に使 えない			Navigation	
NAVSTAR/ GPS (米国)	・NNSSの次世代システム ・軍用/民間用 ・全世界システム ・現在はBlock1衛星7機 による未完成運用	・1960 米海軍 TIMATION開発 ・1967 TIMATION打 上げ ・1973国防省、海軍 軍の計画を統合し てNAVSTAR/GPSと 命名 ・1978NTS-2打上げ	1575.42MHz(L1) 1227.6MHz(L2) (2周波数) L1:P,C/AJ-T L2:Pのみ;軍用 原振=10.23MHz	周波数拡散(SS) SS-BPSK PNコード(ジョーパッド) C/AJ-T:公開 Rate=1.023Mbps Length=1msec コード:非公開 Rate=10.23Mbps Length=7 days	距離測定 測距情報= 1,500bit 速度=50bps C/AJ-T: 30~100m コード: 10m以内	円6軌道 傾斜角55° 21機=6x3+3+3 現在は Block1 7機 Block2 3機	長半径 26,560km 約12時間	三軸	525kg (実験) 844kg (実用) 7.5年	船舶 航空機 時刻比較 測量 ・同時に4衛星が見 えることが必要 ・軍事システムなので 民間利用には懸念			Navigation	
NAVSTAR (ESA)	・純民間の測位システム ・全世界測位システム	・1982 ESA提案 ・1988 概念設計 着手 (正式開発スタート)	1500MHz帯	CDMA TDMA 周波数拡散 (PN-PSK) (マフェスコード)	距離測定 5m	静止軌道(6機) + 楕円軌道 (6x2)=18機 傾斜角62.45°	36,000km 速39,105 km 近1250km 12時間	未定 三軸?	静止 (バック- シフト) 楕円 10年				Navigation	
GRANAS (西独)	・全世界測位システム	・西独提案 ・1988 NAVSATと 1本化 ・運用開始未定	1575MHz(L1) 1228MHz(L2) (2周波数)	CDMA TDMA 周波数拡散 PN-PSK チップレート4Mbps	距離測定 10~25m GPSと違い 衛星が測位 16地上局は ビーム	円、5軌道 傾斜角65° 5x4=20機	20,200km 12時間	三軸	水晶 地上 管制局は 比シム	船舶 航空機 ・3dB17777 簡単な機能 コード同期不要			Navigation Communication GRANAS-IC も検討中	
GLONASS (ソ連)	・ソ連の軍事測位システム	・1984 打ち上げ開始 ほとんど情報なし 運用はされている	1597-1617MHz (L1) 1240-1260MHz (L2) (24チャネル)	FDMA/BPSK C/AJ-T: 0.5Mbps 周期1msec コード 5.11Mbps	距離測定 100m	円、3軌道 傾斜角64.8° 3x8=24機 現在5機	だ円 長半径 25,510km						Navigation	
ARGOS (CNES)	・科学衛星 ・データ収集及び測位 ・全世界、24時間 加レグ	・1978 運用開始 ・TIROS計画終了の 1990代終わりまで 予定	401.650MHz	PSK データレート400bps	ドップラー 効果 3~5km	TIROS, NOAA (気象衛星) のブレイク 極軌道	850km 101分			科学分野 海洋調査な ど。	衛星受信後、利用 者にデータが届くま で6時間程度		Location Data- Collection	

無線測位衛星 (RDSS) システム (その2)

郵政省通信総合研究所

システム名 (運用者)	目的 サービス内容	開発・運用 計画	周波数	通信方式	測位方式 精度	衛星						移動局	備考	
						軌道 個数	高度 周期	姿勢 安定	重量 寿命	搭載 時計	利用者			コスト, EIRP, 料金 その他
STARFIX (米民間)	民間測位システム 主に沿岸石油産業用 米本土 (沿岸500マイル含む)	86.7 MHz 開始	3.7-4.2GHz (Civilian)	スプレッド拡散 PNコード チップレート: 2.4576 Mbps 情報速度150bps	測距 10m程度	Galaxy II Westar IV Satcom FIR 静止	36,000km 1日			衛星は スプレッド 時刻管理 は地上局 で	主に沿岸の 石油産業		Location	
GEOSTAR (米民間)	最終段階運用では 自己システムで 測位+メッセージ通信 System 1. ARGOS利用	83.1 Geostar設立 86.8 FCCより免許 認可	L: 移動→衛星 S: 衛星→移動 C: 7.4MHz-10MHz	スプレッド拡散(SS) (PNコード, 8Mbps) BPSK	測距 7m以内 アンテナ局	静止: 専用+ Package	36,000km 1日			地上に アンテナ	高速移動体 を含む		Navigation Surveilla. Communica.	
		87.5 System1開始	401.650MHz	PSK データレート400bps	ドップラー 3~5km	NOAA 2機 (ARGOS) 極軌道	850km				一部の 長距離トラック		ARGOSシステム を利用 基→移	
GEOSTAR (米民間)	System 2. Link-1 片方向 System 2C 双方向	88.3 SpaceNet打 上	System2: 衛→移 1618.25MHz System2C: 4.184GHz: Cband (衛星→移動局) 1618.25MHz: L (移動局→衛星)	スプレッド拡散(SS) (PNコード, 8Mbps) BPSK 帯域16MHz	ドップラー System2C GPS: System2G Transit: System2T	GTE/SpaceNet -3R (87W) Gstar-3 (126W) 静止 (ドップラー)	36,000km 1日	三軸 (15kg) ドップラー	周波数 安定度 10 ⁻⁶	長距離トラック 現在4000局		2.5dBic	Link1は 1方向 System2Cは 現用システム	
		91.10 DS-1打上予 定	2483.5-2500MHz (S: 衛→移) 1610.25-1626. 25MHz (L: 移→衛)	測距 7m以内 アンテナ局7 全米に100	静止 3機(専用) 8ドップラー 5mドップラー	36,000km 1日	三軸	1.8ト 10年				\$45/Month	System3は 米国システム System4は 全世界システム	
		92.10 DS-2打上予 定 93.10 DS-3打上予 定 (System3.0)	GEOSTARと同じ											
LOCSTAR (CNES, GEOSTAR他)	GEOSTARと同じ ヨーロッパ LOCSTAR-2も計画 アフリカ/中東システム	88.10 LOCSTAR設 立 運用開始 91. 専用衛星打上	GEOSTARと同じ	←	←	Eutelsat/16E IteIsat Locstar	36,000km 1日	三軸						GEOSTARと CNESが15% づつ出資
OmniTRACS (Qualcomm)	メッセージ+測位 (2000文字まで) ヨーロッパでも予定	85.7Qualcomm設立 88.7 サービス開始 88.8 omninet買収 89.2 FCC免許認可	14.0-14.5GHz 移→衛; 2次業務 11.7-12.2GHz (衛→移)	50bps/1MHz, DSs 48MHz, FHSS 5kbps/TDMA 2MHzドップラー	ドップラー 2km程度	Gstar-1 Eutelsat/16E (ヨーロッパ)	36,000km 1日	三軸			長距離トラック 7,000台以 上	追尾アンテナ18dbi 垂直偏波 装置約\$4,000	15kbpsの 高速データ Kuバンド	
LORAN-C (米沿岸 警備隊)	船舶を対象とした 地上系の航行システム 北半球の1/3程度を カバー	第2次大戦後	90~110kHz	Pulse変調	双曲線航法 500m~ 5km					基地局の 基準時計 はゼータ	主に小型船		GPSシステム 完成後は 廃止	

3. 無線航行衛星システム

3.1 NNSS⁽¹⁾

(Navy Navigation Satellite System)

(1) 開発の経緯

地球を高速で周回する衛星から発射された電波を地球上で受信するとドップラー効果により周波数が時間と共に変化する。ドップラー効果による周波数偏移から受信系の測位を行う原理を衛星系に応用した初のシステムが NNSS である。もとは米国 ジョーンズ・ホプキンス大学 (Johns Hopkins University) が提案したものを米国海軍が同大学に研究委託をしたのが開発の契機である。

1960年4月に実験用の衛星が打ち上げられ、トランシット 1B (Transit 1B) と命名された (1A は打上げ失敗)。この衛星には2台の水晶発振器 (10^{-8} の短期安定度, 10^{-10} の長期安定度) が搭載され, 54/108 MHz, 162/216 MHz, 54/324 MHz というような互いに正数比の2つの送信周波数を送信し, 航法の可能性を実証した。

その後, 5機のトランシット衛星が打ち上げられて研究開発が進められ, 1965年に米国海軍は1964年7月以降新しい全天候航法システムの全面運用を行うことを発表し, このシステムを NNSS と名づけた。1963年に打ち上げられた Transit 5B 以降が現在運用されている NNSS 衛星と基本的に同じであると言われている。

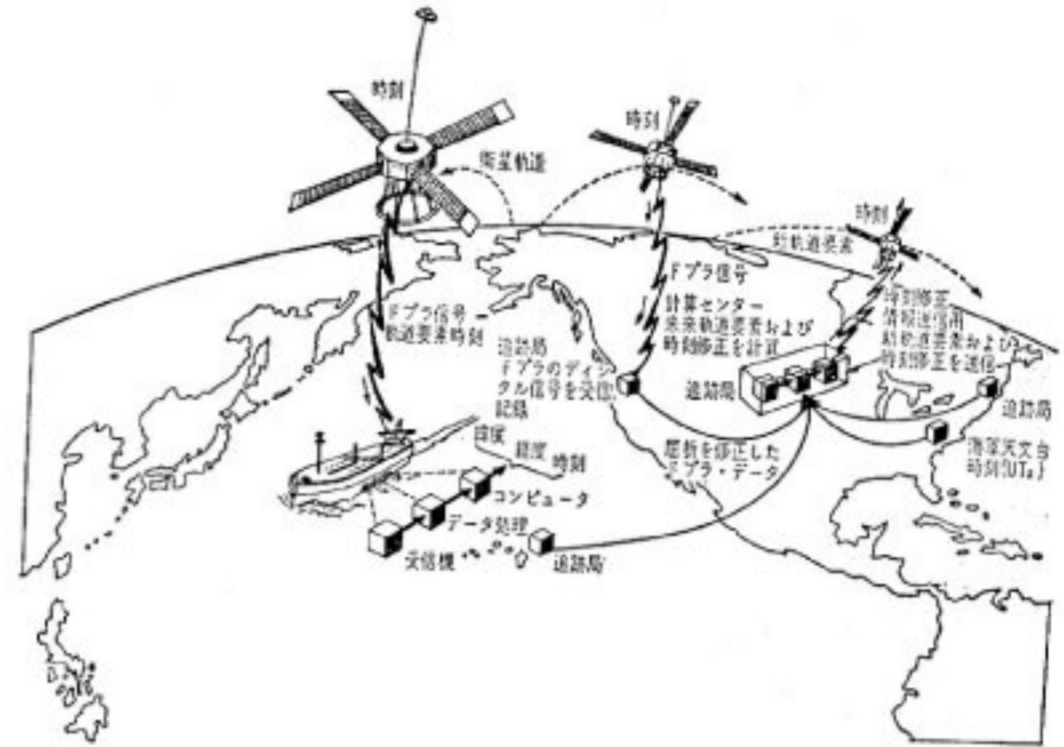
もとは軍用として開発されたシステムであるが, 1967年7月に受信系の測位技術が公開されて以来民間に開放され, 現在は世界中どこでも位置決定が可能である。

(2) システムの構成及び測位原理

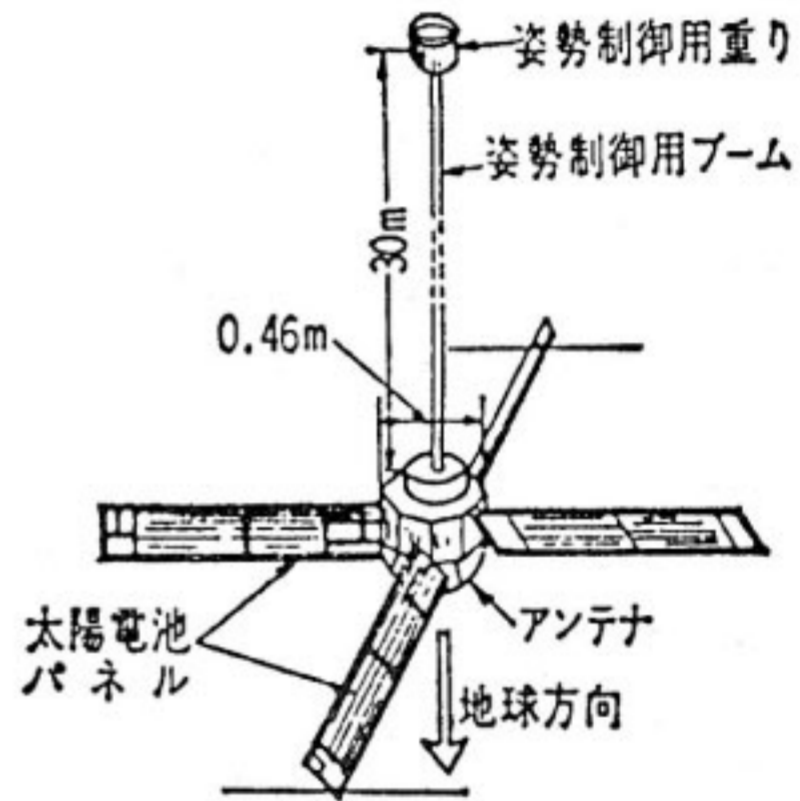
NNSS システムは4~6個の周回衛星と, 4つの追跡局, 計算センター及び軌道情報送信局より構成される。第1図にシステム概念図を示す。地上施設は総て米国内にあり米国海軍により運用されている。

衛星は重力傾斜姿勢安定方式を採用し, 総重量は約63 kg, 発生電力は約30 W である。衛星からは高安定な水晶発振器 ($5 \times 10^{-12}/20$ 分) を原振とする 150 MHz と 400 MHz の2周波数の電波が発射されている。2周波を用いる理由は電離層の屈折誤差を補正するためである。衛星は高度約1000 km, 周期107分のほぼ円形に近い極軌道に打ち上げられている。第2図に衛星(Transit)の概観図を, 第3図に衛星の軌道配置を示す。衛星の軌道の関係から高緯度地域ほど測位回数は増加し, 赤道に近い低緯度地域では90分から120分に1回の測位が可能である。

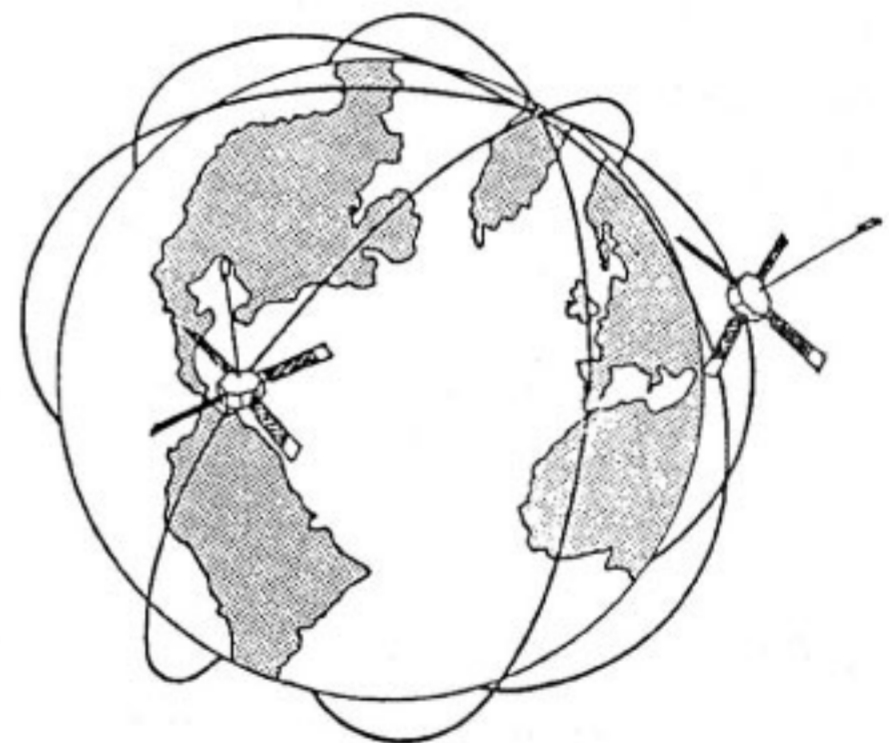
衛星からは極めて高安定な周波数の電波が2分ごとに送信されているため, 受信地点でこの周波数を受信する



第1図 NNSS システム概念図⁽¹⁾



第2図 NNSS 衛星 (Transit) の概略⁽¹⁾



第3図 NNSS 衛星の軌道配置図⁽¹⁾

とドップラー効果により周波数が偏移する。この偏移を測位することにより2分ごとの衛星の位置からの回転双曲面の交点として受信点の測位が可能となる。測位精度は400 MHz の1波を用いた場合約100 m から500 m 程度, 400 MHz と150 MHz の2波を用いた場合には精度は約2倍になる。

3.2 NAVSTAR/GPS^{(2)~(4)}

(Navigation System with Time and Ranging /Global Positioning System)

(1) 開発の経緯

先に述べた NNSS は、初めての全天候型の無線測位衛星システムであり今日でも世界中で数万隻以上の船舶に利用されている。しかし NNSS には次のような欠点がある。

- 運用衛星が6個のため1つの衛星が見える時間が10分程度で、次の衛星が見えるまで1時間以上かかる。
- 衛星が上空に来たとき以外測定できない。
- 測定に時間がかかる。
- 航空機など速度の速いものには使えない。

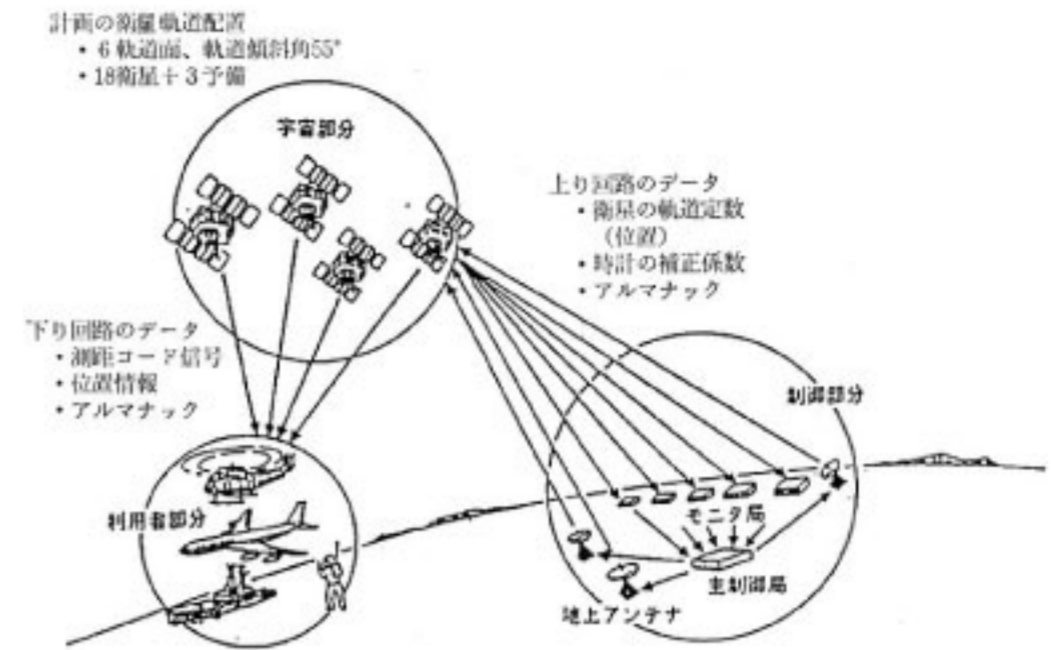
このため、NNSS の実績をもとに米海軍は1960年中頃に NNSS の次世代航行システムである TIMATION (Time and Navigation) の開発に着手し、衛星上の水晶発振器の安定度試験のため、1967年に TIMATION-1 を打ち上げた。一方、米国空軍も航空機用の衛星航行システムである 621B の計画を進めていた。米国防省は両者の計画を統合し、1973年に空軍が主体となって開発を進めることとなり、NAVSTAR/GPS (Navigation System with Time and Ranging/Global Positioning System) と名付けられた。

このため、海軍は TIMATION-III を NTS-1 (Navigation Technology Satellite) と改称し、水晶に加えてルビジウム原子発振器を搭載して1974年に打ち上げた。その後、NTS-2 が1976年に打ち上げられたがこれが GPS として最初の衛星である。

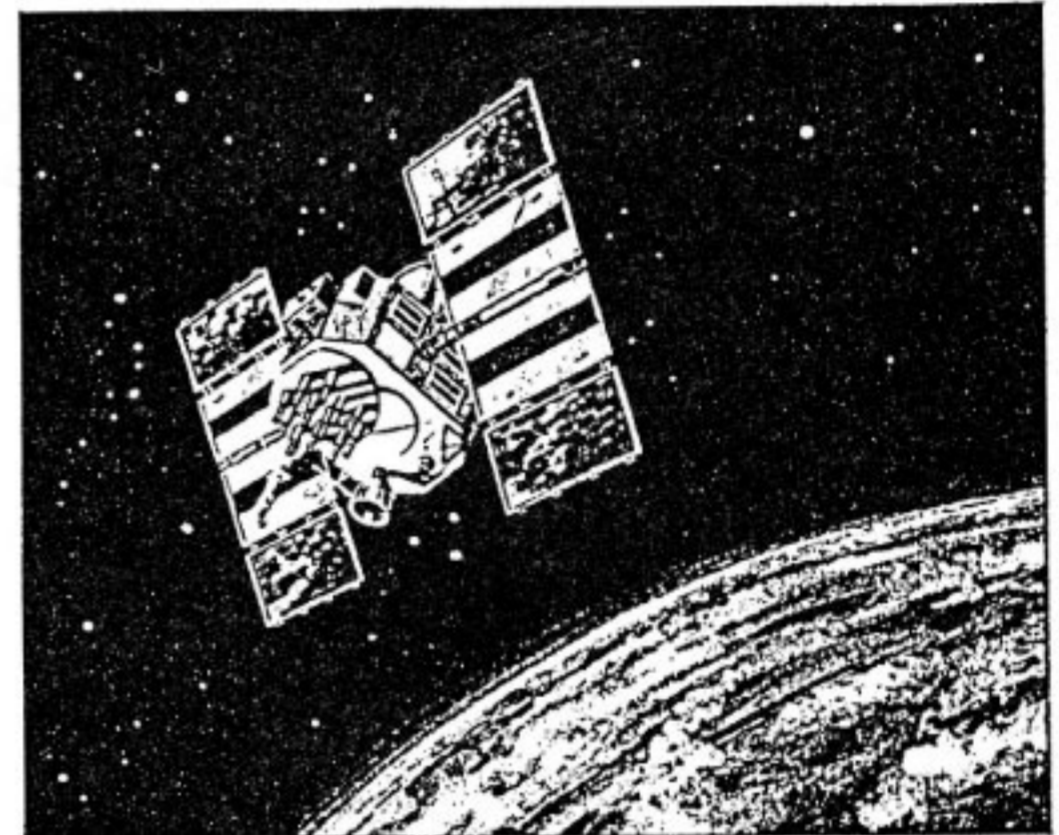
海軍が開発を進めてきた衛星は NDS (Navigation Development Satellite) とよばれるが、NAVSTAR とも呼ばれており NAVSTAR-1 が1978年2月に打ち上げられている。現在、軌道上にある GPS 衛星は実験用のプロトタイプ (Block1) 衛星7機と実用衛星 (Block2) 3機である。当初の計画では1986年に最初の実用衛星 (Block2) がシャトルで打ち上げられ、1980年代終わりまでに24個 (現用18個、軌道上予備6個) の衛星が配備される予定であったが、シャトルの事故で全面運用の開始は大幅に遅れ、Block2 の1, 2, 3号機は各々1989年2, 4, 8月に打ち上げられた。最終全面運用は、1991年頃とみられている。

(2) システムの構成

第4図に NAVSTAR/GPS のシステム構成を示す。システムは宇宙部分 (衛星)、制御部分、利用者部分からなる。現在の衛星は、プロトタイプ (Block1) の実験機で、 10^{-13} /日の高安定のルビジウム原子時計3台及びセシウム原子時計1台が搭載されている。これらの原振



第4図 NAVSTAR/GPS のシステム構成



GPS 衛星の例 (プロトタイプ)

衛星上には、ルビジウムまたはセシウム原子周波数標準を搭載し、1575.42MHz (L1帯) と1227.6MHz (L2帯) の電波をPSK変調して送信する。

第5図 GPS 衛星の例 (プロトタイプ)⁽²⁾

は 10.23 MHz の基準周波数を発振し、2つの周波数 L1 (1575.42 MHz) 及び L2 (1227.6 MHz) を送信している。2つの周波数が使用されるのは NNSS と同様、電離層内での電波伝搬遅延を補正するためである。

GPS の特徴は、全ての衛星の時計が GPS システム全体として管理された時計に同期していることである。各衛星の原子時計は地上の制御局により常にモニターされ、時刻補正データが各衛星へ送信されている。

地上制御局のうち主管制御局はカリフォルニア州バンデンバーグ空軍基地内に、モニター局はアラスカ、ハワイ、グアムに置かれている。

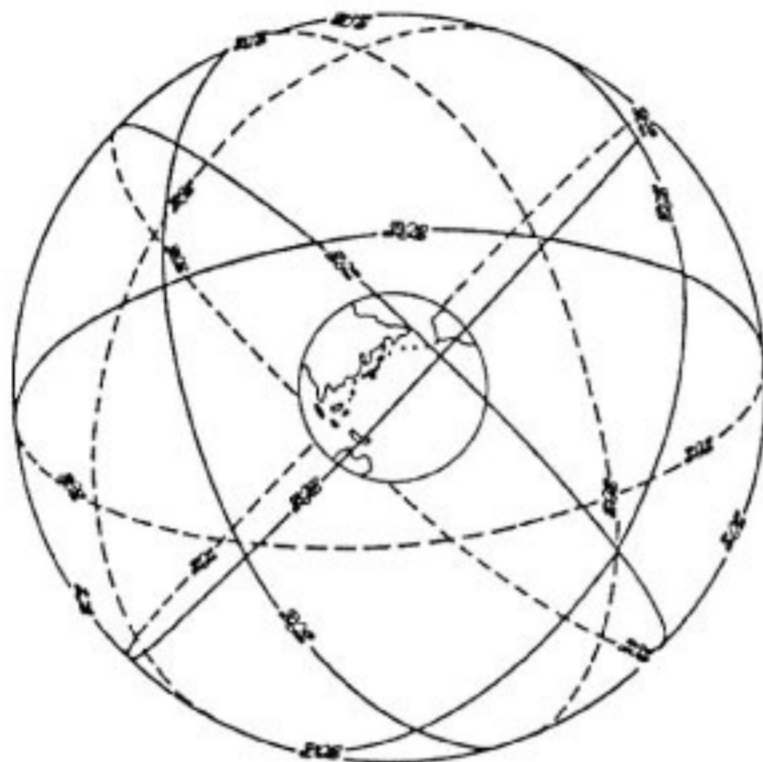
測位に必要な時刻補正データ、軌道予測データなどは衛星からの航法信号の中に含まれ、利用者はこの信号を解読することによって測位を行う。航法信号の情報速度は 50 bps、長さは1フレーム 1500 bit の30秒である。

当初は、3軌道面に8個ずつ合計24個の GPS を配置する計画であったが予算上の制約から6軌道、各3個の

18衛星、軌道上予備3機の計21機に変更されている。現在は実験用プロトタイプ衛星 (Block1) が7機、実用機 (Block 2) が3機軌道上にある。第5図に GPS 衛星の概略図を、第6図に軌道を示す。

(3) 測位原理及び精度

GPS を利用した測位方法には原理的に異なる 2 つの



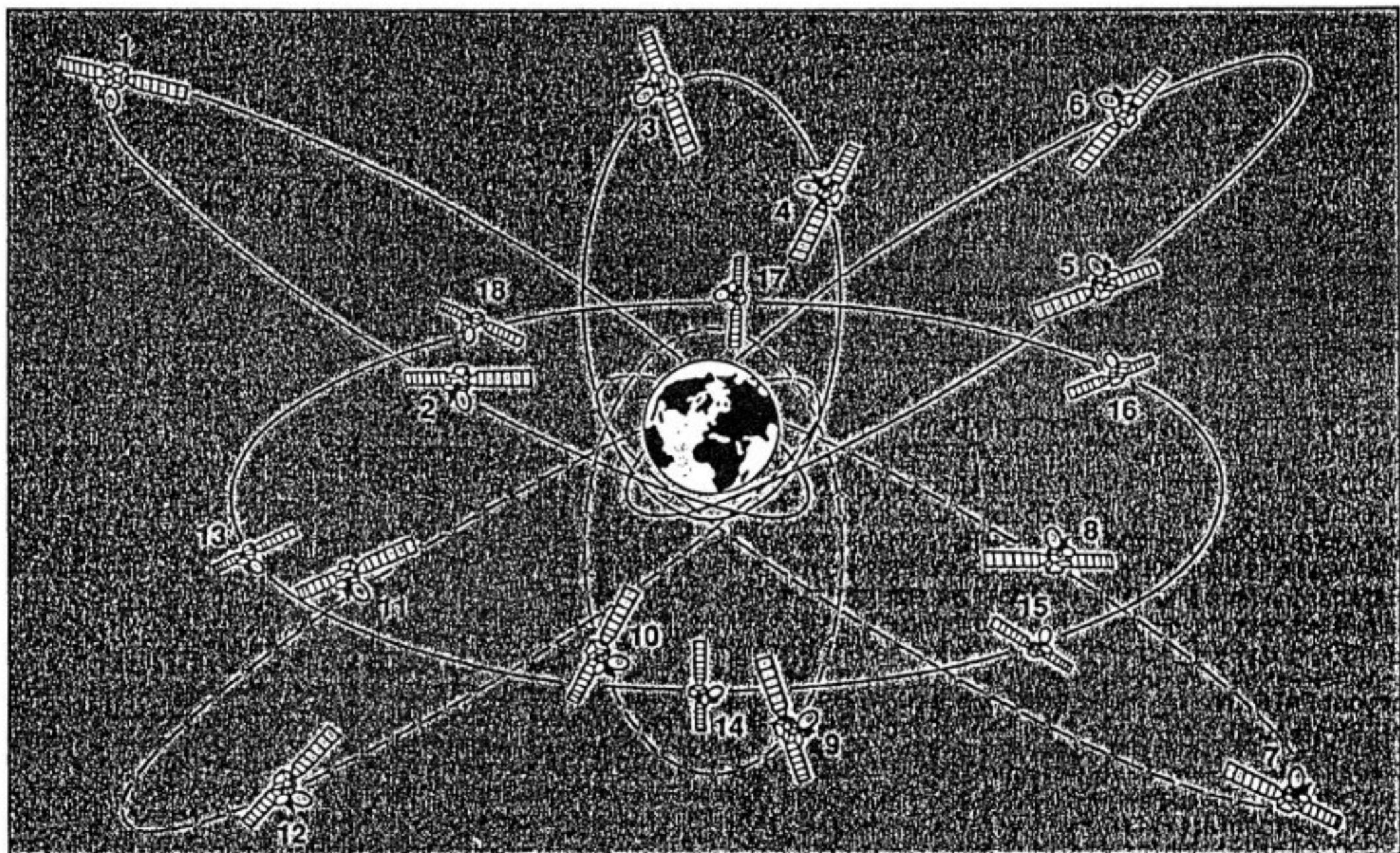
GPS 衛星の軌道

軌道高度約 20 000 km, 周期 0.5 恒星日 (約 11 時間 58 分), 6 つの軌道面に 3 個ずつ, 合計 18 個の衛星を配置する。

第 6 図 GPS 衛星の軌道配置図

方法がある。1つは4つの衛星からの信号を受け、その中に含まれる航法情報 (C/A コード及び P コード) を解読することにより絶対測位を行うものであり直接法と呼ばれる。もう1つの方法は、2地点においた GPS 受信機で衛星からの信号を受信し、2台の受信機に到達する時間差を信号の位相差から求めて相対測位を行うものでコードに含まれる情報を解読する必要はない。ここでは移動体の測位という観点から前者の直接法について述べる。

原理的には、3つの衛星から距離を各々測定し、その等距離曲面の交点が測位点ということになる。これで三次元の測位 (変数が x, y, z , で決まる位置) が可能であるが、時間の不確定さという変数が加わるため4つの衛星が必要となる。距離を測定するための測距信号として疑似雑音 (Pseudo Noise) コード (PN コード) が用いられる。このコードには C/A コードと P コードの2種類ある。P コードの P は Precision (精密) と protect (保護) の略と言われ、チップレート (繰り返し周波数) が 10.23 MHz で、長さが約 6×10^{12} bit (約 7 日) と長いコードである。L1 には P コードと C/A コードが含まれているが、L2 には P コードのみが含まれている。P コードは L1 と L2 波で送信され、電離層の影響を補正できるため精度は数 m~数10 m と言われる。このコードは軍用にしか使用できず一般には公開されてい



ESA's Navsat system would employ satellites in elliptical orbits (numbered 1-12) and in geostationary orbit (spacecraft 13-18).

AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY/January 25, 1968

第 7 図 NAVSAT 衛星の軌道配置図

い。

C/A コードの C は Coarse (粗) 又は Clear (明らか), A は Acquisition (捕捉) を示すと言われており, 民間には C/A コードのみが開放されている. チップレートは 1.023 Mbps, コード長は 1023 bit で 1 msec である. C/A コードを用いた測位精度は 100 m 以内と言われるが条件が良ければ数 10 m の実績がある.

3.3 NAVSAT⁽⁵⁾⁽⁶⁾

(Navigation Satellite System)

(1) 開発の経緯

米国の軍事主導形のシステムである NAVSTAR/GPS に対抗し, 純民間の測位衛星システムを構築するため, 1982年にヨーロッパ宇宙機関 (ESA) が提案したものである. 1988年には ESA の正式な計画として予算が計上され, 概念設計の作業が開始されている. 当初は GPS 初期の計画と同様 3 軌道面に 8 個ずつ計 24 個の衛星を配置する計画でいたが, システム開始の段階から特定の地域で完全な運用を可能とするためと, 静止軌道衛星と周回軌道衛星の欠点を補うため現在では楕円軌道と静止軌道の両方を用いる方法が検討されている. さらに後述する西独の GRANAS 計画と一本化されている.

1988年に概念設計が開始されたばかりであり, 衛星の打上げ計画も明らかになっていない現在, 具体的な運用計画は不明であるが早くても 2000 年頃, 全面運用は 2000 年初期と考えられる.

(2) システムの構成

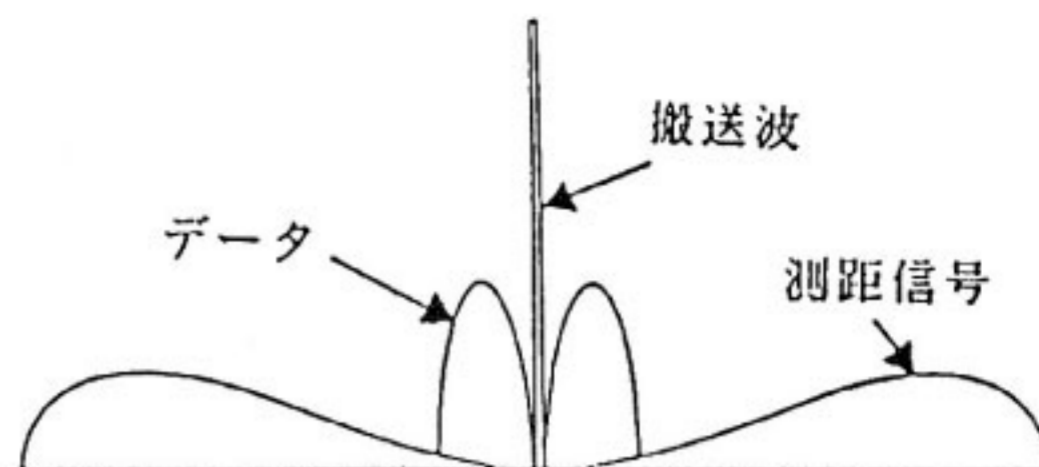
NAVSAT は, NAVSTAR/GPS と同様に宇宙部分, 地上制御部分及び利用者部分から構成されている. GPS と顕著に異なるのは, 66 の静止軌道衛星と 12 機の周回軌道衛星の計 18 機の衛星で宇宙部分を構成する点である. これは両者の覆域の欠点を相互に補うことと, 導入初期段階から限定された地域での全面運用をするためである. 静止軌道衛星は専用衛星ではなく相乗り (パッケージで搭載, いわゆる piggy-back, ピギーバック) を考えている.

楕円軌道衛星は, 軌道傾斜角 62.45° の 6 つの軌道に 2 機ずつ計 12 機の衛星を配置する. 周期は 12 時間である. 衛星の配置図を第 7 図に示す. 測位精度は 5 m と言われている.

衛星から送信される信号は 9 つのバースト信号 (長さ 230.6 msec) を 1 フレームとする TDM 波で各バースト信号は第 8 図に示す周波数スペクトルをもっており 3 つの部分から構成される.

(a) 連続搬送波

…ドップラー偏移測定による粗の位置測定とスペクトル拡散信号の捕捉



第 8 図 NAVSAT 信号の周波数スペクトル

(b) スペクトル拡散信号

…総ての衛星が同一 PN コードを用いている. 高精度測距用に運用

(c) データ

…軌道情報など

地上制御部分及び利用者部分の機能は, 基本的に NAVSTAR/GPS と同じと言えるが, NAVSTAR/GPS と, ソ連の軍用航法システムである GLONASS に何らかの運用上の問題が生じたときは利用者に対して警告を発する能力をもたせるようにしていると言われる. 米国とソ連の軍用システムがシステム状態をリアルタイムで監視したり警告したりする能力をもっていないためである.

3.4 GRANAS⁽⁵⁾

(Global Radio Navigation System)

(1) 開発の経緯

西独で提案されている無線測位衛星システムである. NAVSAT と同様, 純民間利用のシステム構築をめざしている. NAVSAT が地上制御部分に複雑さを持たせているのに対して, GRANAS では衛星上に原子時計は搭載しない代わりに自動動作などの複雑な機能を持たせて, 簡単な地上施設を数多く設けるシステムとなっている. GRANAS は先の項で述べたように ESA の計画として NAVSAT と一本化されたという情報 (Aviation Week, 1989.1.25) もある. また現在は GRANAS に通信機能をもたせた GRANAS-IC (Integrated Communication) が検討されている.

(2) システムの構成

GRANAS の測位原理は NAVSTAR/GPS や NAVSAT と同様, 複数の衛星からのスペクトル拡散信号による距離測定であるが, 最大の特徴は衛星が地球上に分散配置されている地上局に対して電波の往復測距により自分で自動的にその位置を決定することである. 従って地上施設による衛星の高精度の軌道決定と, その予測値の作成と衛星への送信が不要である. この衛星位置決定のため約 16 の地上局を配置し, 1 局の管制運用センター以外は衛星上での自動測位のための簡単なトランスポンダ

を備えるだけでよい。

宇宙部分は傾斜角 65° 、高度 20,200 km、周期12時間の5つの軌道に4機ずつ計20機の衛星を予定している。衛星上の時計は地上局で校正され、各地上局の時計はセンターの時計と同期した原子時計である。衛星からの信号は NAVSAT と同様 TDM で、同一のチップレート 4 Mbps の PN コードが用いられる。各衛星は長さ 120 msec のバースト信号を 1.4 秒毎に2つの周波数 (1500 MHz 帯) で発射する。

(3) 測位原理及び精度

衛星は視野内にある3つの地上局との往復測距により3つの伝搬時間を測定する。この時に往復測距であるから衛星の時間誤差は相殺される。

衛星は全ての地上局の正確な位置を知っており、これと伝搬時間から求めた距離により衛星自身の3次元位置を知ることができる。衛星は自分の位置データと正確な時刻を含んだ情報を放送する。利用者は4つ以上の衛星からの信号を受信し、衛星の位置データを計算することにより測位を行う。衛星には原子時計が搭載されていないので地上の管制局の原子時計 (ルビジウム) により校正する。

衛星から利用者へ送信される信号は PN コード (チップレート 4 Mbps) で周波数拡散された TDMA 波で、周波数は 1575 MHz (L1) 及び 1228 MHz (L2) の2周波数である。L2 は電離層の遅延測定に用いられる。

1フレームは 1.4 sec でガードバンドは 20 msec である。1フレームは、プリアンプルのあとに衛星位置情報 (3次元)、衛星時間及び L2 周波数によるプリアンプルと各 20 msec ずつより構成される。

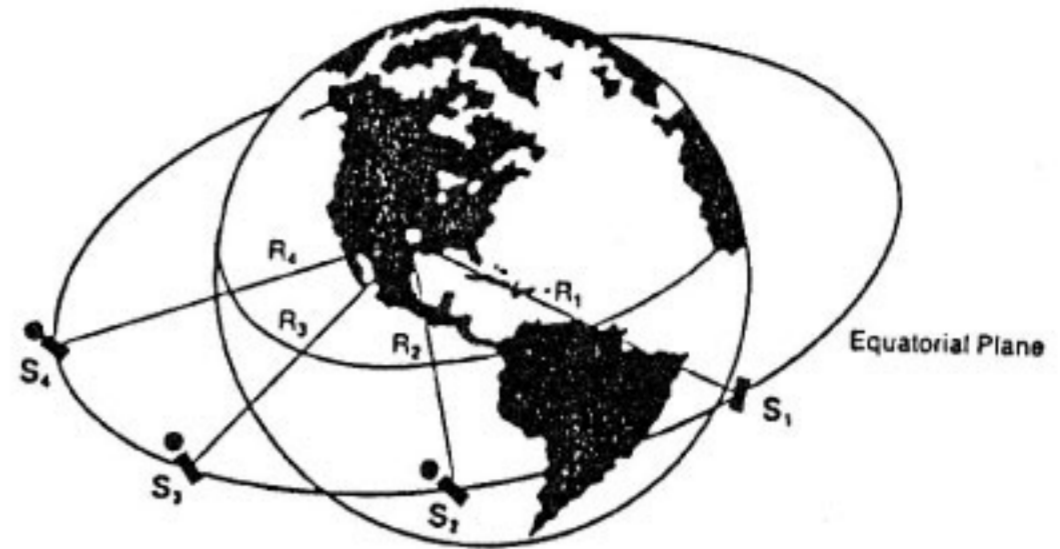
測位精度は、静止物体で 6 m、高速移動体 (航空機) で約 10-20 m と見積られている。

3.5 GLONASS^{(7) (8)}

(Global Orbiting Navigation Satellite System)

(1) 開発の経緯

GLONASS はソ連が現在開発を進め、一部運用を行っている測定システムで NAVSTAR/GPS に類似している。実験運用は1984年に開始されたと言われるが詳しい情報はほとんど公開されていない。1988年5月に開催された国際民間航空機関 (ICAO) の「将来航空航法システム (FANS)」委員会に提出した文書で GLONASS の一部を明らかにしている。また、英国 Leeds 大学の I. D. Kitching, S. A. Dole 及び P. Daly のグループは GLONASS の信号を受信し、その内容を解析するとともに、GLONASS と NAVSTAR/GPS の両方を用いた測位システムの提案⁽⁸⁾などを行っている。



第9図 STARFIX 衛星の軌道配置図

(2) システムの概要

GLONASS のシステム構成は NAVSTAR/GPS に非常に類似しているが、顕著に異なる点は情報をコード化 (CDMA) している点と同じだが NAVSTAR/GPS が1つの周波数 (L1 と L2 とあるが各々を) を時分割多元接続 (TDMA) しているのに比較し、GLONASS は周波数分割多元接続 (FDMA) していることである。衛星からの測位情報は NAVSTAR/GPS と同様2つの周波数 (L1, L2) で送信されるが L1 及び L2 は各々 1597-1617 MHz 及び 1240-1260 MHz の帯域の1波で、L1 は 0.5625 MHz、L2 が 0.4375 MHz 間隔で各々 36 および 24 チャンネルである。

NAVSTAR/GPS と同様、L1, L2には P コード、L1 には C/A コードが含まれているが C/A コードのチップレートは 0.511 Mbps、P コードは 5.11 Mbps である。変調方式は BPSK である。

衛星は 120° 間隔、高度 2500 km の3つの円軌道に各々 8機で計24機配置されることになっているが現在は2つの軌道に5機が運用されている。

3.6 STARFIX⁽⁹⁾

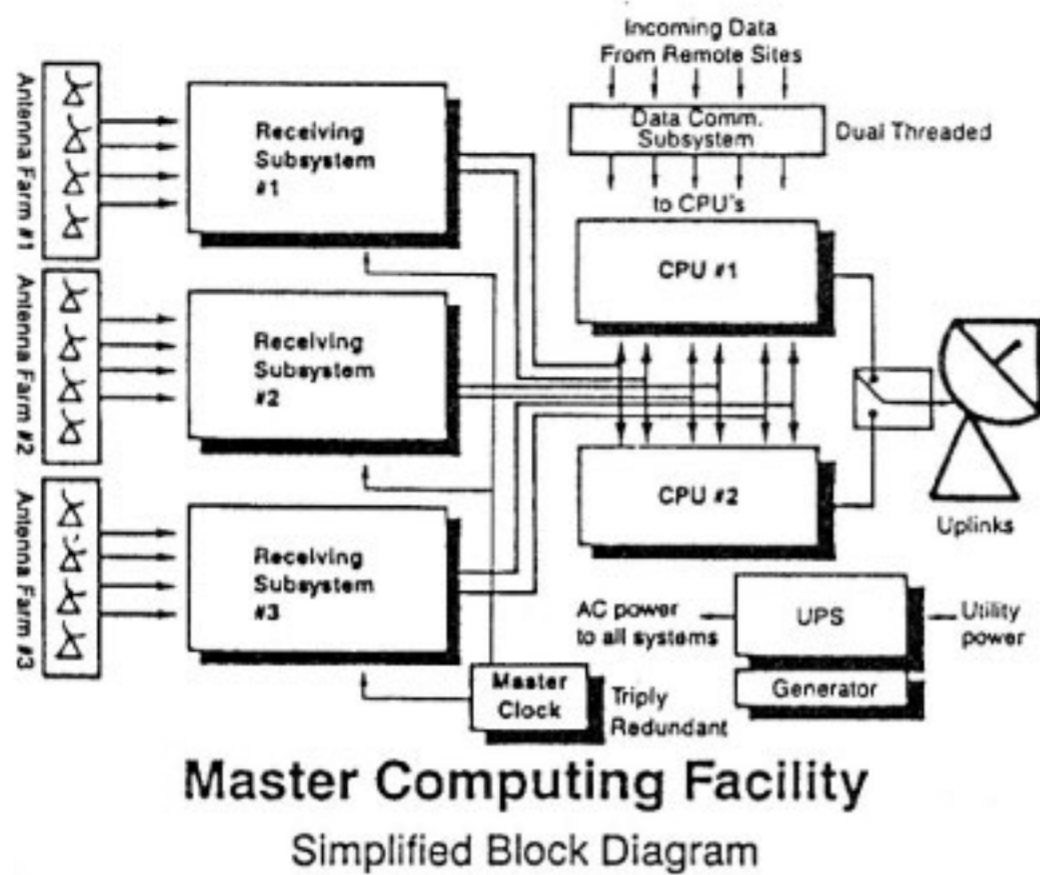
(1) 開発の経緯

民間により運用されている測位衛星システムで、3年の開発期間の後、1986年初期から運用されている。米国本土及び 500 マイルの沿岸をサービス域としているが主な利用者はメキシコ湾の石油産業である。将来は、ヨーロッパにもシステムを展開する予定である。

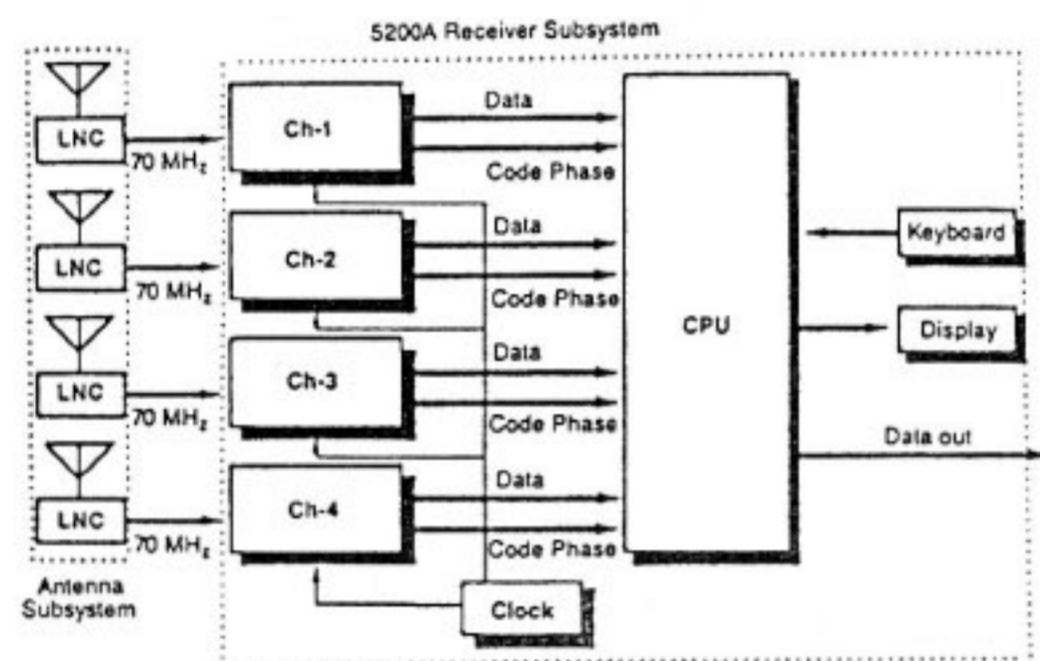
(2) システムの構成

STARFIX システムは、第9図に示すように少なくとも3機以上の静止衛星、衛星に信号を送信する基地局、衛星の追尾管制を行う追尾局、Master Computing Site と呼ばれる中央計算局及び受信専用の利用者局から構成される。

基地局は中央計算局から送られたデータを、STARFIX へ 6 GHz の周波数で送信する。追尾局は全米に 10 ヶ所あり、STARFIX の正確な管制データをリアルタイムで中央計算局へ送る。中央計算局は、総てのデータの



第10図 STARFIX システムの中央計算局 (Master Computing Facility) のブロック図



第11図 STARFIX システムの利用者局ブロック図

処理を行うとともに、STARFIX のメッセージ機能に問題が生じた場合には利用者警報を送出する。中央計算局はテキサス州の Austin にあり、基地局及び追尾局とは電話回線で接続されている。中央計算局のバックアップ局は同州の Houston にある。第10図に中央計算局の、第11図に利用者局のブロック図を示す。

(3) 衛星

STARFIX は現在、以下に示す米国内の 3 機の商用衛星の C バンド中継器機をもちいている。

- Galaxy II (286° E), Hughes
- Westar IV (261° E), Western Union
- Satcom FIR (221° E), RCA

(4) 測位原理及び精度

基本的測位原理は PN コードを用いた測距で、3.7-4.2 GHz の周波数帯を用いている。STARFIX 衛星は、GPS システムのように時刻管理等行わず単にデータを

伝送するだけである。時刻同期等は総て地上局で行う。

利用者の位置 (X, Y, Z) と時刻偏差 dT の 4 変数が未知数となるが、4 機の衛星位置を既知数とする方程式だけでは十分な精度がえられないため、4 番目の独立変数として利用者局の地球中心からの距離を用いて正確な位置決定をしている。衛星位置と信号の位相は、長基線を持つように全米に配置された管制局で測定され 1 秒に 2 回の割合でリアルタイムで中央計算局へ送られ dT が正確に計算される。

情報速度は 150 bps で、測距用の PN コードはチップレート 2.4576 Mbps である。データとしては次のような情報が送られる。

- (1) 各管制局の測距情報
- (2) 各管制局の情報 (Health status)
- (3) 衛星位置情報
- (4) 衛星の情報 (Health status)
- (5) 時刻
- (6) 利用者のメッセージ

メキシコ湾で行った測位精度の評価実験では 5 から 7 m の精度が得られた。

3.7 ARGOS⁽¹⁰⁾

(1) 開発の経緯

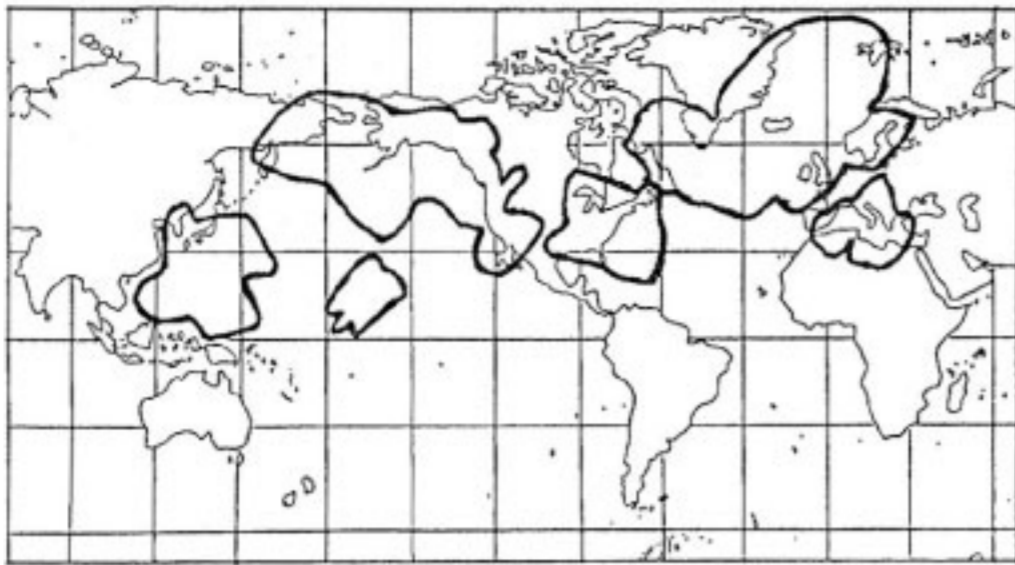
ARGOS とは、ギリシャ神話にでてくる 50 対の目を持つ神のことである。ARGOS システムは、NAVSTAR/GPS に代表されるような航法のためのシステムではなく、科学分野での学術的利用を目的とした一方向 (被測定物→衛星→利用者) のシステムである。

フランスの国立宇宙研究センター (CNES)、米国の航空宇宙局 (NASA) 及び海洋大気庁 (NOAA) の 3 機関が共同で開発及び運用を行っている。衛星は NOAA の気象衛星である TIROS 及び NOAA にサブシステムを搭載してある。

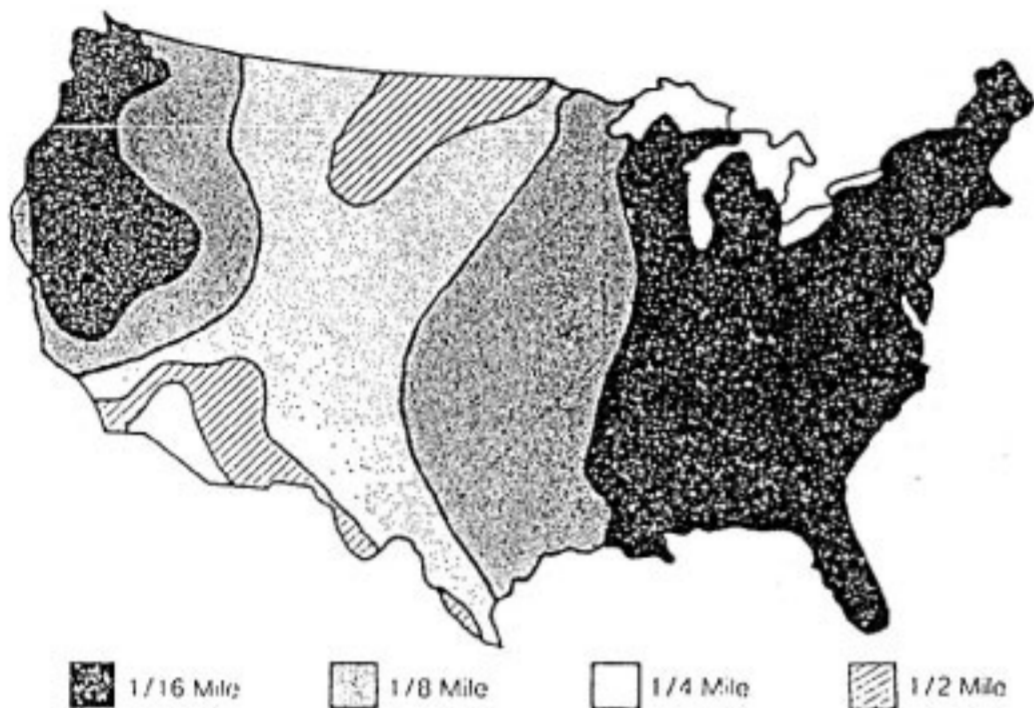
このサービスは、NOAA の気象衛星 TIROS-N シリーズの 1 号機が打ち上げられた 1978 年に始まったが、TIROS シリーズの気象衛星計画が終了する 1990 年代の終わりまで継続される予定である。

(2) システムの概要

宇宙部分は、高度約 850 km の極軌道上にある気象衛星 NOAA 及び TIROS に搭載されたサブシステム (ARGOS) である。ARGOS はデータ収集・測位用として 2,000 のプラットフォーム (Platform Transmitter Terminal ; PTT) と呼ばれる送信機からのデータを、データ収集のみとしては 16,000 以上のプラットフォームを収容する能力がある。各々のプラットフォームはそのタイプにより 40~200 秒毎にデータバーストを送信する。衛星により受信されたデータ及びドップラー偏移を受け



第12図 LORAN-C システムの有効地域⁽¹¹⁾



第13図 LORAN-C システムの米国内での測位精度⁽¹³⁾

た周波数は衛星上で処理され、データは復調される。情報速度は 400 bps, 変調方式は PSK である。

衛星上に蓄積されたデータは米国 Wallops Island (バージニア), あるいは Gilmore Greek (アラスカ) のテレメトリ局を通してメリーランドにある NOAA センターに送信される。NOAA センターから即時にフランスの CNES ARGOS センターへ送られて処理された後、データ及び位置情報は各利用者へ直接送られる。衛星による測定が行われてから利用者へ情報が届くまで約 2~6 時間である。

周波数は 401.650 MHz である。気象援助, 気象衛星 (地球から宇宙) [2次業務] に割当てられているもので測位業務用の周波数ではない。

(3) 測位原理及び精度

ドップラー周波数偏移を用いた測位である。測位精度は多くの要因に依存するが、衛星の高度誤差を 500 m, 被測定物の最大平均速度を 100 m/sec とすると、位置精度は 3-5 km, 速度精度は 0.5-1.5 m/sec である。

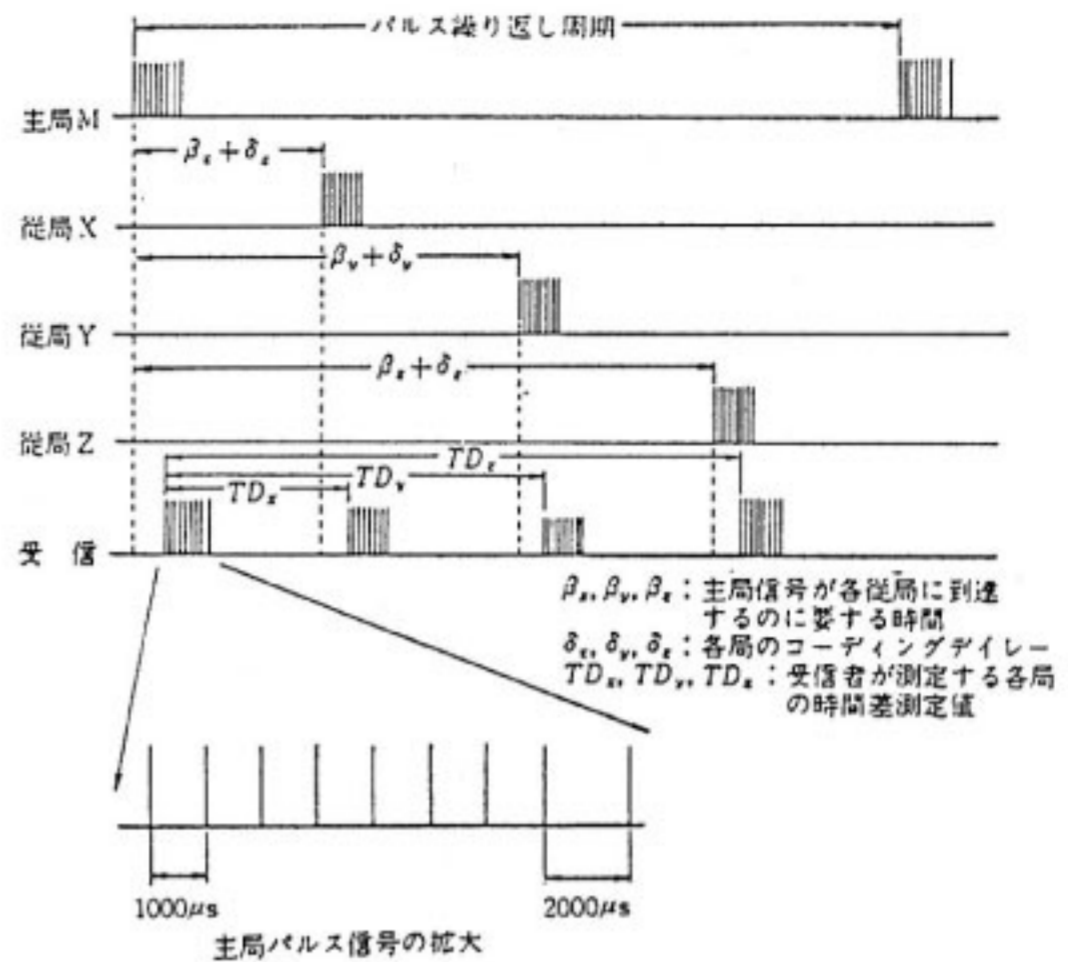
3.8 LORAN-C⁽¹¹⁾

(Long Range Aid to Navigation-C)

このシステムは地上系のシステムである。

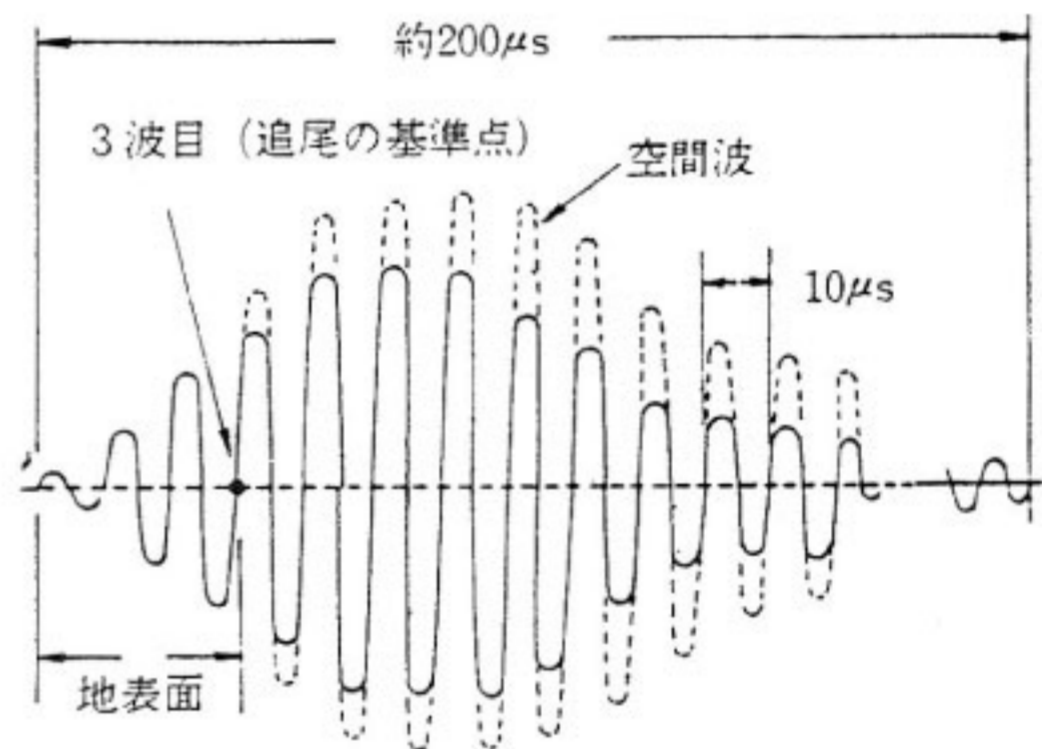
(1) システムの概要

双曲線航法により測位を行うシステムである。周波数帯 90 kHz から 110 kHz の長波帯 (LF) が用いられて



第14図 LORAN-C 送信順序⁽¹¹⁾

8 本のパルス波の内の 1 本 (100kHz)



第15図 LORAN-C 電波の受信波形⁽¹¹⁾

いる。米国の沿岸警備隊 (Coast guard) が運用している。全世界で15のロランC局チェーン網があり、北半球の約 1/3 を有効範囲としている。安価な受信機で航行できるため、1983年までに世界中で約 6 万台以上の受信機が、主に小型船舶に装備された。

第12図にロランCシステムの有効範囲を示す。第13図には米国内でのロランCシステムの測位精度を示す。一般的には測位精度は 500 m から 5 km 程度と言われる。

(2) 測位原理

地上に設置された複数の標識電波発射基地からの信号を移動局で受信し、2局からの信号の時間差から1本の双曲線が引ける。同様に他の2局からの受信信号からも双曲線がひけるが、これらの双曲線の交点が移動局の位置となる。基地局であるロラン送信局は 90 kHz から 110 kHz の長波帯のパルス電波を放射する。送信局は、主局と 2-4 の従局が組になってチェーンを構成している

が、2局が同時にパルスを発射すると主局と従局の識別もできないので、測定した時間差に対して2本の線が求まり移動局の測位が困難となる。そこで、次のような対策を行っている。

- ① 主局は一定の繰り返し周期でパルスを発射する。
- ② この電波は主局と従局間の伝搬時間 β の後に従局に受信される。
- ③ 従局は主局の電波を受信してから主局の送信する繰り返し周期 L の $1/2$ とさらにコーディング・ディレイと呼ばれる分だけ遅延してパルスを発射する。
- ④ 移動局は主局と従局のパルス電波を受信し、それらの到達時間差を測定して位置を計算する。

ロランCを受信する時は、いかなる海域においても主局(M)、従局(X)、(Y)、(Z)から送出される信号を受信する順序は同一となるように主局に対してコーディングディレイがかけられている。そのようすを第14図に示す。主局の識別方法として、視覚的に判別できるものとして主局の信号には $1,000 \mu\text{sec}$ 間隔で発射されている8本のパルス群に加えて、9本目のパルスが8本目のパルス位置から $2,000 \mu\text{sec}$ の位置に送信されているので、このパルスを観測することにより識別する。これらのパルスは第15図に示すように 100 kHz の搬送波を幅が約 $200 \mu\text{sec}$ のパルスで変調したパルスであり、それを $1,000 \mu\text{sec}$ の間隔で8本並べている。ロランCは、M局とX-Z局の電波の時間差を第14図に示したように測定して、双曲線の交点から位置を決定するシステムである。

4. 通信・測位複合衛星システム

4.1 GEOSTAR^{(12)~(15)}

(1) 開発の経緯

GEOSTARは米国GEOSTAR社が構築を進めている通信と測位を複合させたシステムである。GEOSTAR社はスペースコロニーの提唱者として有名なプリンストン大学のオニール教授(Dr. Gerard K O'Neill)が自らの提唱するシステムを実現するために1983年2月に設立したベンチャー企業で、本社はワシントンD.C.にある(従業員数約80名)。GEOSTARは同社の商標として登録され、いまやRDSSの代名詞とも言えるほどよく知られている。

最終的には、GEOSTARシステム専用の6衛星を配備して双方向のメッセージ通信及び測位サービスを世界的規模で行う計画であるが、1987年からARGOS衛星を用いて測位及びデータ伝送サービス(System 1.0)を開始した。現在は2機の静止衛星に受信専用パッケージ(RO)を搭載して、移動局から衛星経由の基地局方

向へは 1500 MHz 帯(Lバンド)を、基地局から移動局へは 4 GHz (Cバンド)を用いて変則的な双方向システム(System 2C)が運用されている。今後のシステム構築の計画は次節で述べる。

すでに述べたように、従来は通信と測位は別個の機能として完全に分離されたシステムと考えられていた。従って、周波数割当も各々個別に定められていたため、1983年にGEOSTAR社を含め、McCaw Space Technologies, Inc., MCCA American Satellite Service Corporation及びOmninet Corp.の民間4社は米国通信委員会(FCC)に対し通信と測位が同時にサービスできる周波数の割当を求める免許申請を行うと同時に、当局に対してシステム構築と衛星の打ち上げを働きかけた。1985年にはFCCは早くも通信・測位用の周波数割当を行い、1986年にはOmninetを除く3社が実験免許を得ている。Omninetは後述するように1989年2月に事業免許を受け 12 GHz 帯でサービスを行っているが、他の2社は事実上活動を行っていない。

この周波数割当は米国内だけの問題だけでなく、国際的には世界無線通信主管庁会議(WARC)で討議、決定されるべきもので、1987年に開催された移動体に関するWARC(WARC-MOB '87)では周波数割当の見直しが行われた。この点については第5章で述べるが、米国FCCの通信・測位システムに対する見解は、基本的には測位サービスが主であり、メッセージ通信は補助的サービスとし、無線局免許は無線測位サービスに対して与えていると解釈されている。

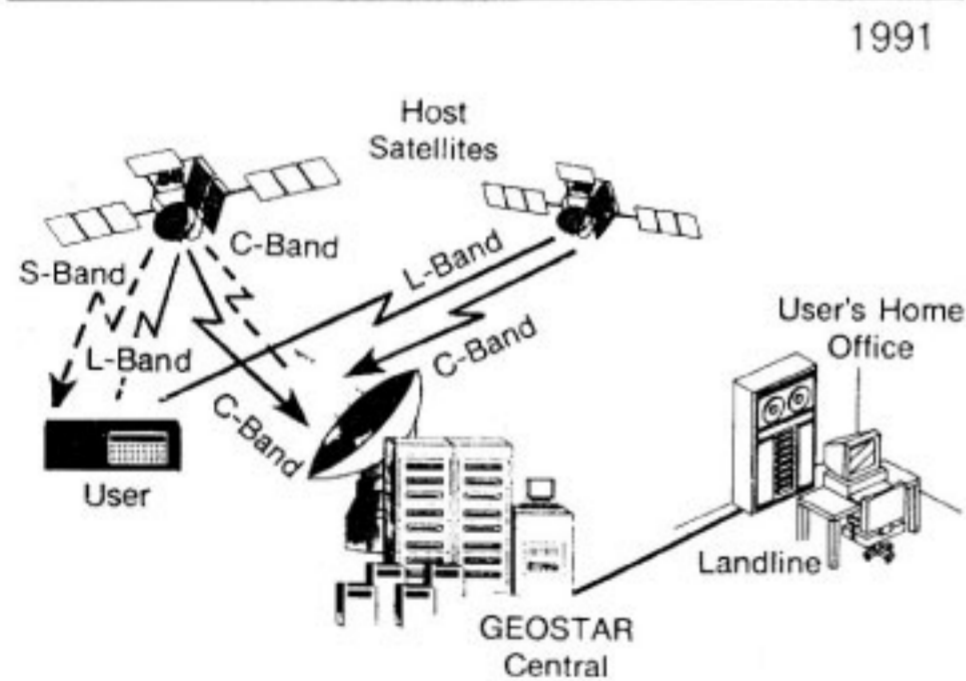
以下に、GEOSTARの開発経緯を簡単にまとめる。

- 1983. 2 GEOSTAR社設立。
- 1983. FCCに対し無線局免許を申請。
- 1986. 8 FCC, 無線局免許を認可。
- 1987. 5 System 1.0 運用開始。
ARGOS衛星(NOAA 9/10)を用いて移動局の測位を行い、衛星経由でARGOS地上局へ測位データを送る1方向システム(全世界)。
- 1988. 3 GEOSTAR-RO1(GTE SpaceNet 3R, 87° W)アリアンにて打ち上げ。
- 1988. 5 System 2.0 運用開始。
ロランCを用いての移動局の測位を行い、測位データを基地局へ送る1方向システム(北米・中南米)。
- 1988. 9 GEOSTAR-RO2(GTE Gstar-3, 126° W)アリアンにて打ち上げ。
Gstar-3は打ち上げ後静止化に失敗したが現在は静止軌道上にある。
- 1989. 7 System 2C 運用開始。

第2表 GEOSTAR 開発計画

システム	運用開始時期	衛星	サービス地域	サービス形態	測位方法精度	メッセージ形式	備考	
1.0	1987. 5より	NOAA 9, 10 (ARGOS)	全世界	測位のみ	ドップラー (ARGOS) 平均 8 km Hours	-----	測位のみ 1方向	
2.0	1988. 6より	RO-1 (SpaceNet 3 R)	米北	測位+ メッセージ			移動局→基地 100文字	1方向 Lバンド
	1988. 9より	RO-2 (Gstar-3)						
2 Plus	1988. 11より	RO-1 RO-2	北中米	ページング機能 追加	ロラン C	移動局→基地局	1方向 Lバンド	
2C	1989. 7より	RO-1 RO-2		基地局→移動局の データ伝送追加 双方向	2 km 以下 Minutes	移動局→基地局 100文字 基地局→移動局 100~24000文字	双方向 L+Cバンド	
3.0	1991/92予定	DS-1 DS-2 DS-3 (専用衛星)	北中米 ヨーロッパ	自己システム による 測位 及びメッセージ	静止衛星 による 測距	双方向	双方向 2~3千万局 利用者 L+Sバンド	
4.0	1993予定	DS-1 DS-2 DS-3	全世界 他のシステム との共用 まで含む	LOCSTR等との 共用で全世界 ネットワーク	5~10 m Seconds	100文字	双方向 最終運用 段階	

System 3



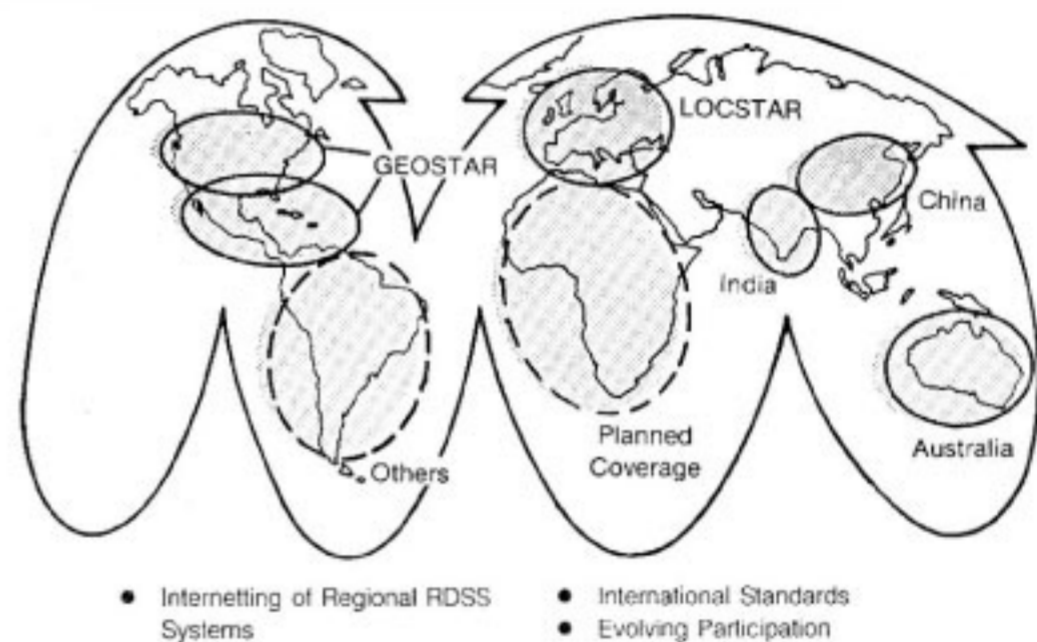
- Two-Way Messaging
- RDSS Geolocation
- Up To 30 Million Packets Per Hour

第16図 GEOSTAR System 3 の概念図

System 2.0 に基地局から移動局への通信回線 (Cバンド) を付加して双方向システムとしたもの (北米).

1991. 10 GEOSTAR DS-1 打ち上げ予定. System 3.0 運用開始予定.
専用衛星にてサービス開始(北米, ヨーロッパ).

System 4



第17図 GEOSTAR System 4 のサービス地域

1992. 10 GEOSTAR DS-2 打ち上げ予定.
1993. 7 GEOSTAR DS-3 打ち上げ予定. System 4.0 運用開始予定.

GEOSTAR システム世界規模運用段階.

(2) システムの構成

GEOSTAR システムは, 制御局部分, 測位データ校正用地上局部分, 2機以上の宇宙部分及び利用者部分から構成される. 制御局は予備局と回線制御用の大型計算機センターを含む. 測位データ校正用地上局部分はベンチマーク局とよばれ, 位置が正確に定められた測位校正

第3表 GEOSTR System 3.0 & 4.0 伝送方式諸元

	基地局→移動局	移動局→基地局
情報速度	64 kbps	16 kbps
前方向誤り訂正	R=1/2, K=7, 畳み込み	R=1/2, K=7, 畳み込み
復調方式	3ビット軟判定	3ビット軟判定
変調方式	BPSK データの直接周波数拡散	BPSK データの直接周波数拡散
PNコード長	2 ¹⁷ -1 bit (約16.4 msec)	2 ¹⁷ -1 bit
チップレート	8 Mbps	8 Mbps
拡散利得	21 dB (128:1)	27 dB (512:1)

用の固定局である。宇宙部分は、現段階では受信専用 (Receive Only) の中継器パッケージ (RO) を非専用衛星に搭載してあるが将来は送受信機能を有する専用衛星を含め6機を静止軌道に配備する計画である。利用者部分は小型・低廉な通信機で、測位情報の表示、メッセージの送受信等が可能である。

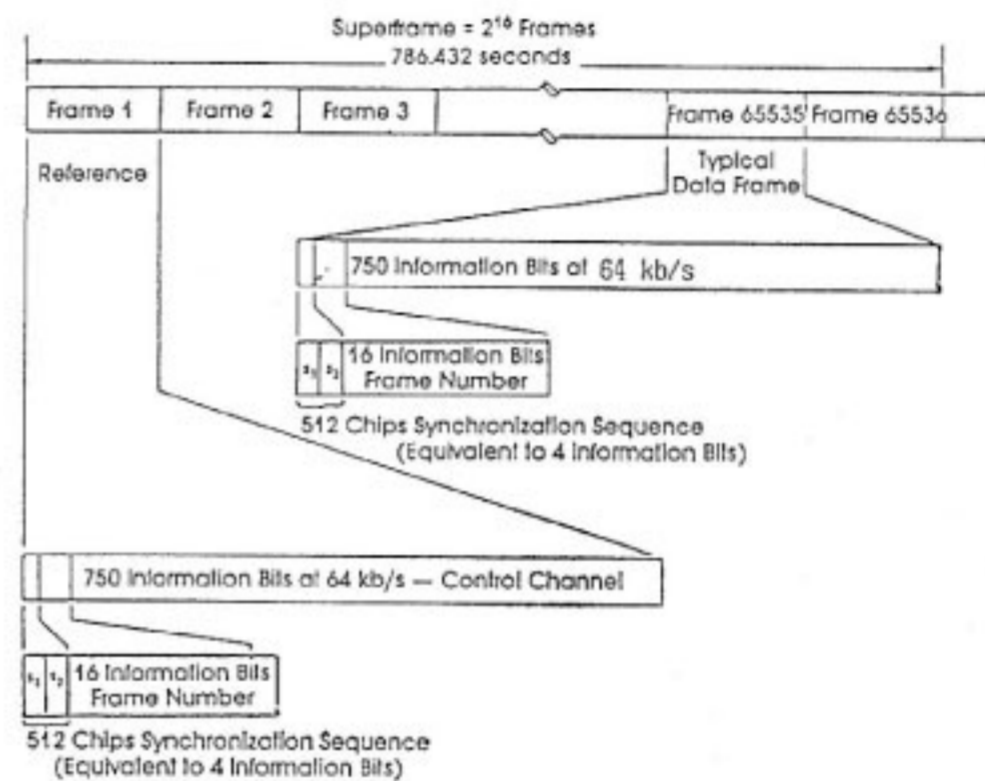
GEOSTAR は最終運用までを4段階に分けてシステムを構築する計画で、1993年に予定されている専用衛星 DS-3 の打ち上げ後に System 4.0 に移行して他のシステム (Locstar 等) との共用を含めて最終的な全世界的サービスを展開する計画であるが、System 3.0 が実質的な最終運用段階と言える。現在はシステム構築の途中であり、以下に述べるような変則的なシステム運用をしている。ここでは、まず最終的なシステム構成を述べた後、構築過程の各システムについて述べる。GEOSTAR システムの開発計画を第2表に示す。

(3) 最終運用システム (System 3.0, System 4.0)

(3.1) 基本的なシステム機能

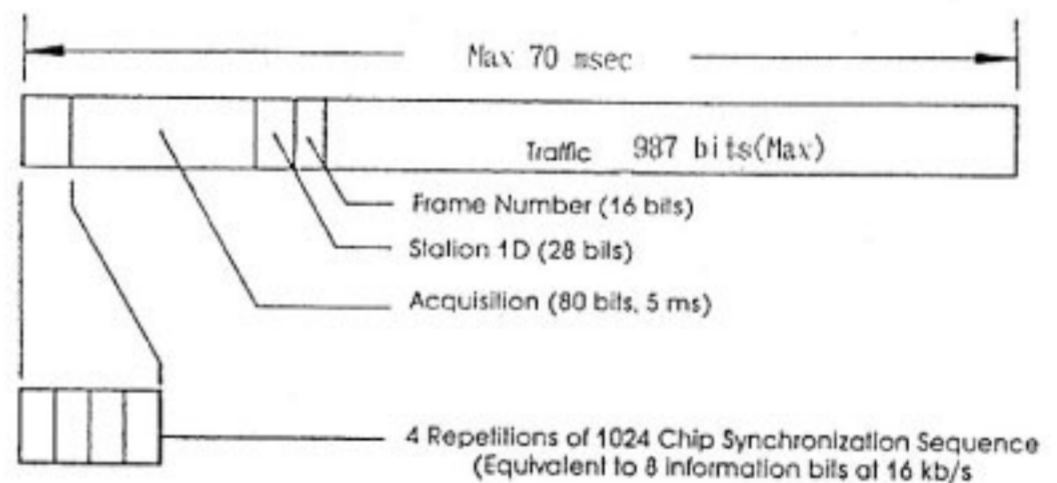
System 3.0 は、米国内での最終運用システムである。System 3.0 の概念図を第16図に示す。System 4.0 は第17図に示すように、System 3.0 と他のシステムとの共用を図り全世界的規模のシステムとしたものである。基本的な機能をまず述べる。

GEOSTAR システムは周波数拡散 (SS) 技術を用いて多数の移動局を対象として測位及びメッセージ通信を行うものである。地上中央局は1機の静止衛星を経由して全ての利用者に質問信号 (Interrogation signal) を送出する。利用者は信号に含まれる ID から自局向けの信号を判別し、自局 ID と必要ならメッセージを追加して送信する。メッセージを送信する必要が無い場合には利用者局は自動的に応答信号を送出する。利用者局からの送信信号は2機の静止衛星を経由して中央局で受信される。中央局は2機の衛星経由の信号伝送時間差と地図データベースから利用者局の位置を決定する。このとき、ベンチマークと呼ばれ、世界中に配置された地球局からの校正値を用いて種々の誤差要因を補正して正確な測位を行う。また、中央局では常に利用者局をモニターして



Outbound Superframe Structure
Source: Federal Communications Commission, General Docket No. 84-690 (1985).

第18図(a) GEOSTAR システム 基地局→移動局 (Outbound) のデータフォーマット



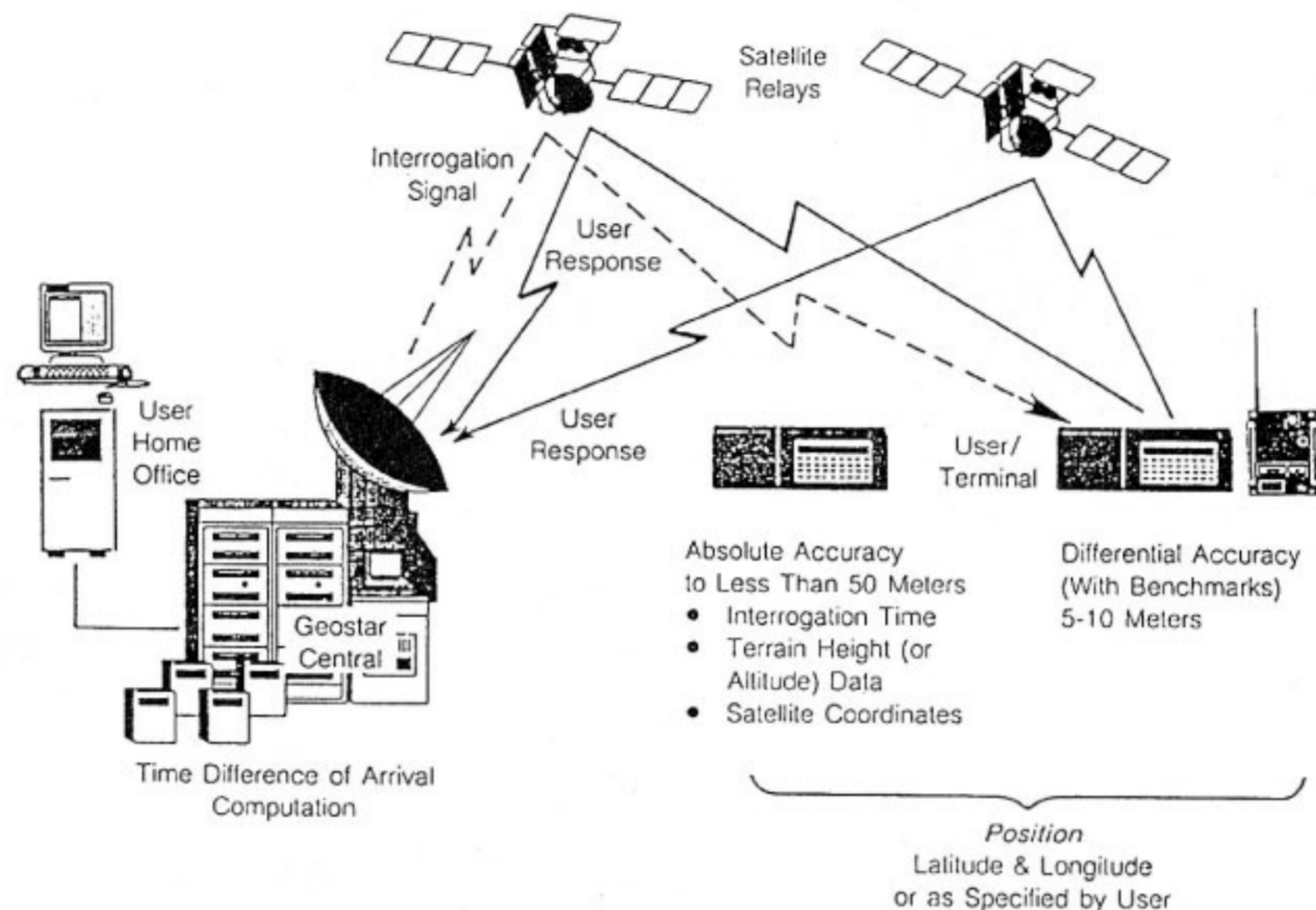
Typical Format for Inbound Transmissions: Minimum Information Bit Rate 16 kb/s
Source: Federal Communications Commission, General Docket No. 84-690 (1985).

第18図(b) GEOSTAR システム 移動局→基地局 (Inbound) のデータフォーマット

おり、送信先の利用者局から受信確認がくるまで何度でも質問信号を送信する。中央局では利用者局からの信号を受信すると、1秒以内に利用者からのパケット信号を処理し、メッセージ等のデータを計算機に記録するとともに受信確認信号を利用者局に返送する。中央局は利用者局の情報を常に更新して、要求に応じて利用者局の親局へデータの転送を行う。

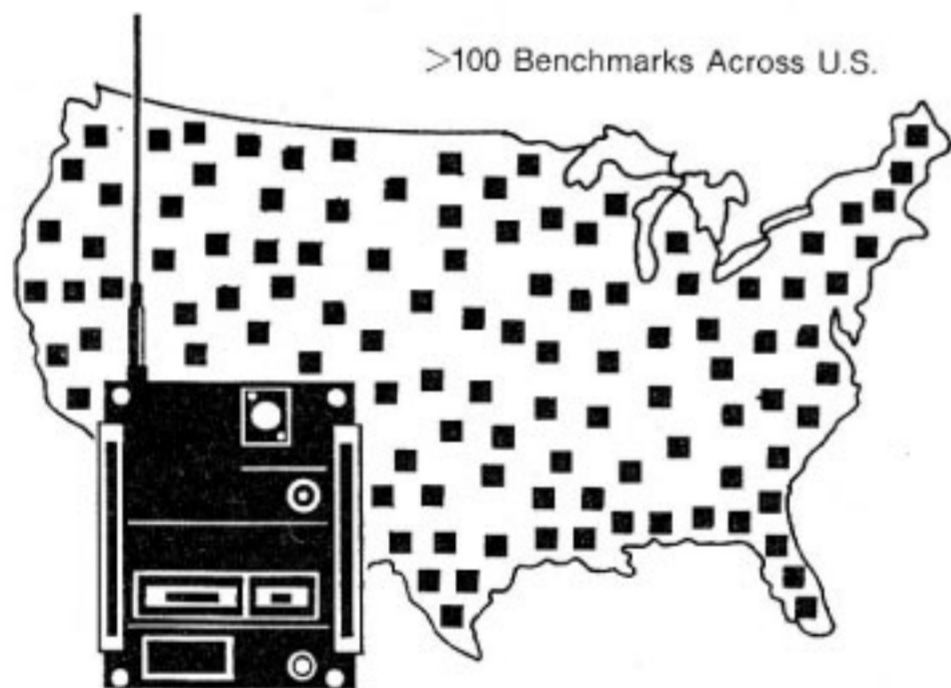
このシステムでは1時間に約2, 3千万局の利用者を

System 3 Positioning Technique



第19図 GEOSTAR System 3 の測位技術概念図

Benchmarks



第20図 ベンチマーク局の米国内での配置

収容可能で、月当り45米ドルの通信料金で利用可能となる。

中央局を含む地上局から衛星への回線は 6525.0-6541.5 MHz, 衛星から基地局へは 5150.0-5216.0 MHz の周波数帯 (Cバンド) が使用される。衛星から移動局は 2483.5-2500 MHz, 移動局から衛星へは 1610.0-1626.5 MHz の周波数帯 (Lバンド) が使用される。使用する周波数帯域は 16 MHz である。

伝送方式諸元を第3表に、基地局から移動局へ (Outbound) のデータフォーマットを第18(a)図に、移動局から基地局へ (Inbound) のデータフォーマットを第18(b)

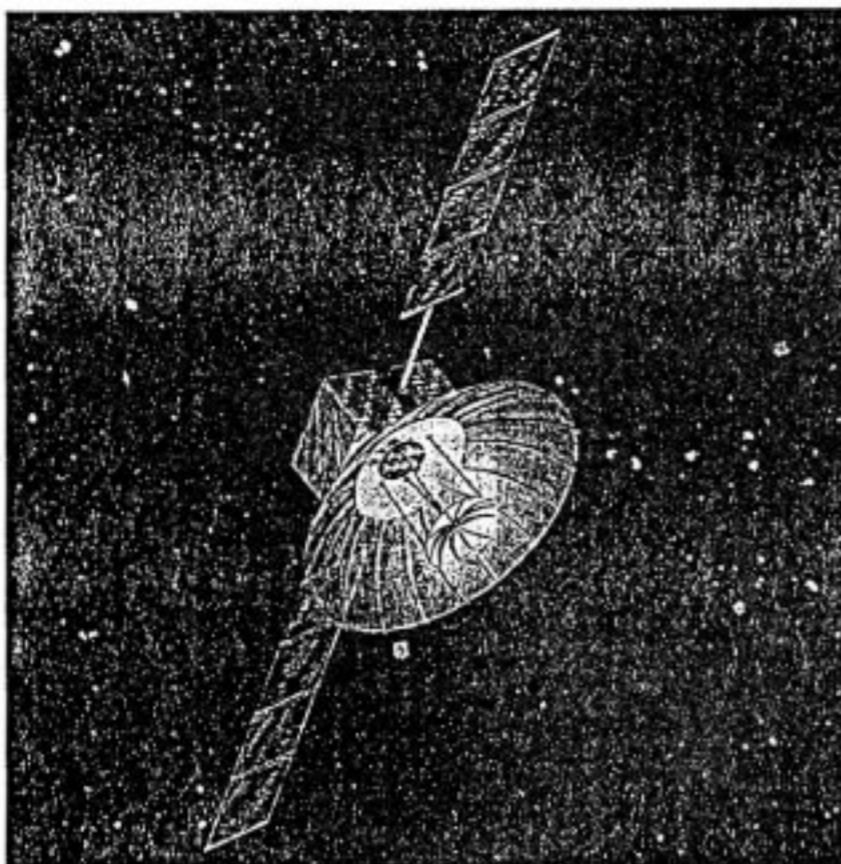
第4表 GEOSTAR 測位誤差要因

利用者受信機雑音	2.8 m
ベンチマーク受信機雑音	1.4 m
衛星位置不確定性	0.1 m
大気遅延	0.5 m
信号の多重散乱	1.0 m

図に示す。

(3.2) 測位方法及び精度

System 3.0 の測位概念図を第19図に示す。GEOSTAR 中央局から送信された質問信号に対する返答信号は2機の衛星を経由して中央局で受信される。このとき、2機の衛星を別経路で往復した信号には時間差が生じるが、この時間差から距離を算出し中央局にある地図データベースと比較して位置を求める。この方法により約30から50 m の測位精度が得られる。さらに、ベンチマーク局と呼ばれる校正用局を用いると測位精度は 5 m から 10 m 程度まで期待できる。赤道付近 (南北2度以内程度) では約 100 m 程度まで測位精度は劣化する。GEOSTAR システムの測位機能で重要な要因であるベンチマークは第20図に示すように全米 100 局程度設置される計画である。ベンチマークはあらかじめその位置が正確に求められているため相対的な測位により固定的な測距誤差を補正することができる。しかし、静止衛星位置の不確定性、電離圏及び対流圏誤差などは補正されない誤差とし

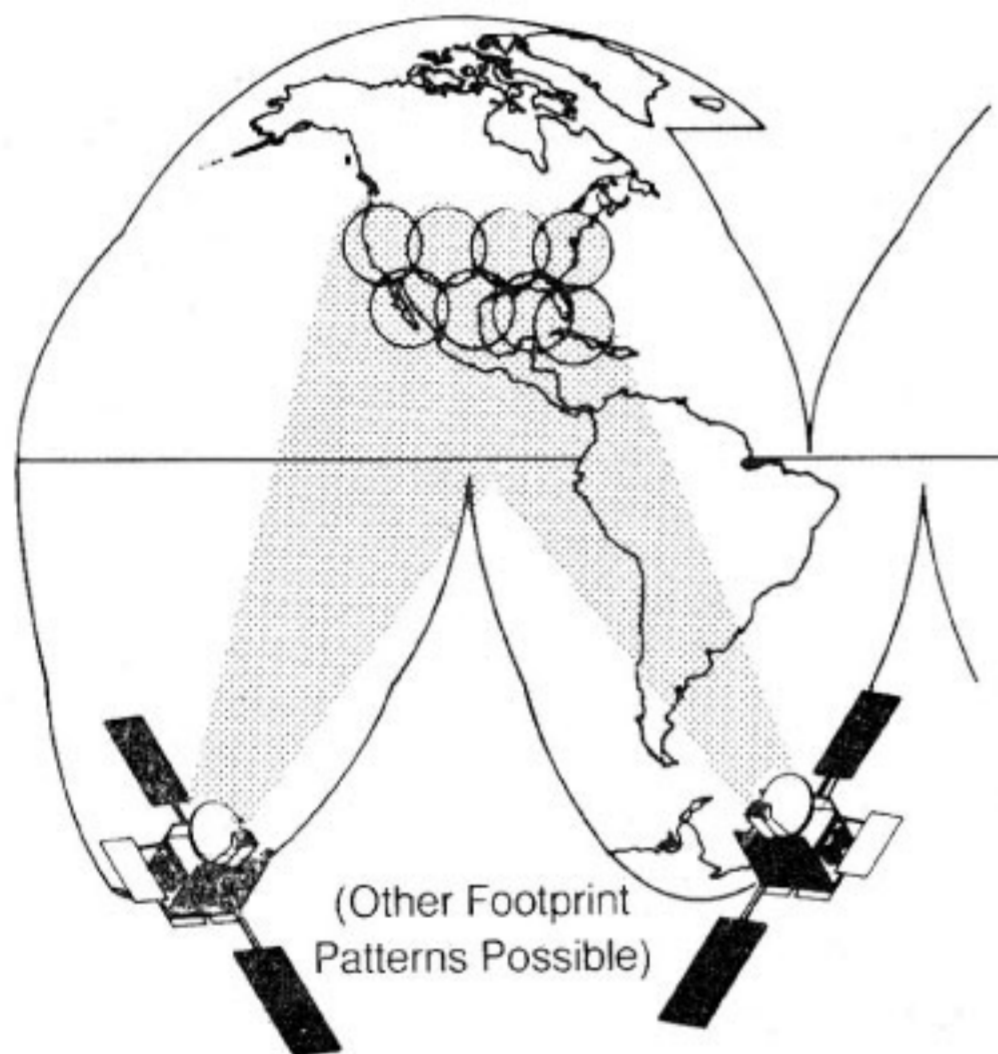


First Geostar satellite, shown in an artist's concept, was launched into a geosynchronous orbit in March. The spacecraft locates the position of mobile users in the U. S.

AVIATION WEEK & SPACE TECHNOLOGY/December 19, 1988 89

第21図 GEOSTAR 専用衛星の想像図

Dedicated Satellite Multibeam Coverage

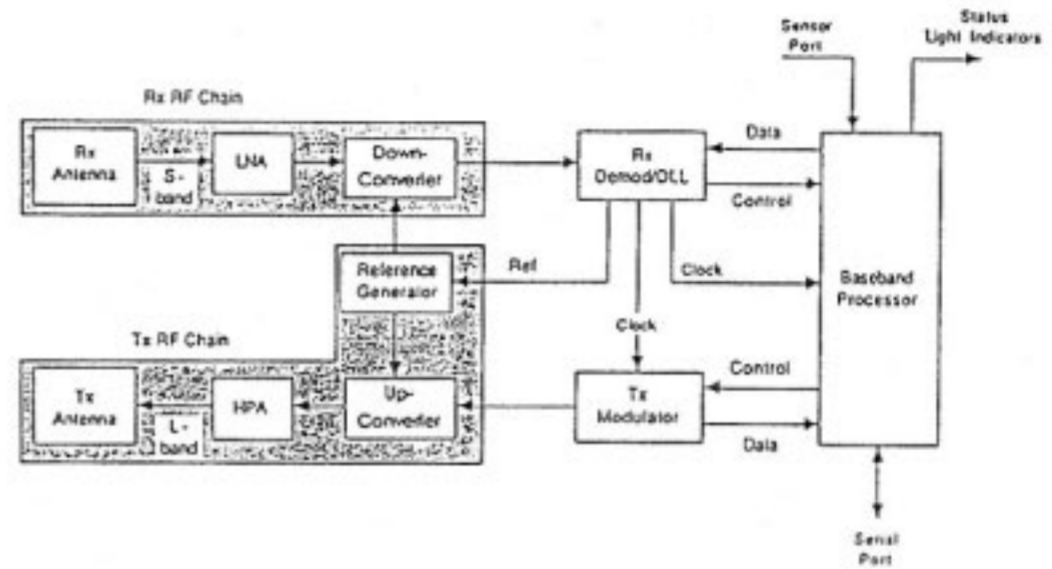


第22図 GEOSTAR 専用衛星のマルチビーム覆域⁽¹³⁾

て残る。第4表に、これらの誤差要因と測位誤差を示す。

(3.3) 衛星

FCC は1986年8月に GEOSTAR に与えた無線局事業免許において、地上予備機を含めて4機の専用衛星の製造及び打ち上げを認めている。これにより、GEOSTAR 社は1987/88年に GE Aero-Space に対し4機の専用衛星を仮発注し、そのうち3機を正式に契約した。専用衛



Standard Transceiver Configuration

第23図 標準的な GEOSTAR 受信機の構成

星は、GEOSTAR RD-1, RD-2 及びRD-3 と呼ばれ、重量は約1.8トンである。第21図に GEOSTAR 専用衛星の想像図を示す。直径5mのアンテナを有し、第22図に示すように各直径約900kmから1800kmの8ビームで北米をカバーする計画である。衛星の管制は GEOSTAR, あるいは GE Aero-Space が行う。

GEOSTAR が計画している System 3.0 は最終運用段階の米国内のシステムであるが、さらに System 4.0 では全世界的なシステムを構築するため他のシステムとの共用を目指している。後に述べる LOCSTAR は GEOSTAR のヨーロッパ版とも言えるシステムであり、他にも南米、オーストラリア等の国内衛星に GEOSTAR と両立性のあるパッケージを搭載する計画が検討されている。

(3.4) 移動局局

現在、米国内では Hughes Network Systems, Motorola Government Electronics, The Sony Corporation of America の3社が GEOSTAR 通信機を製作、販売している。既に数千台の通信機がトラック、鉄道運輸業界へ販売されている。基本機能を持つ通信機の最終的な目標価格は \$3,000 以下である。

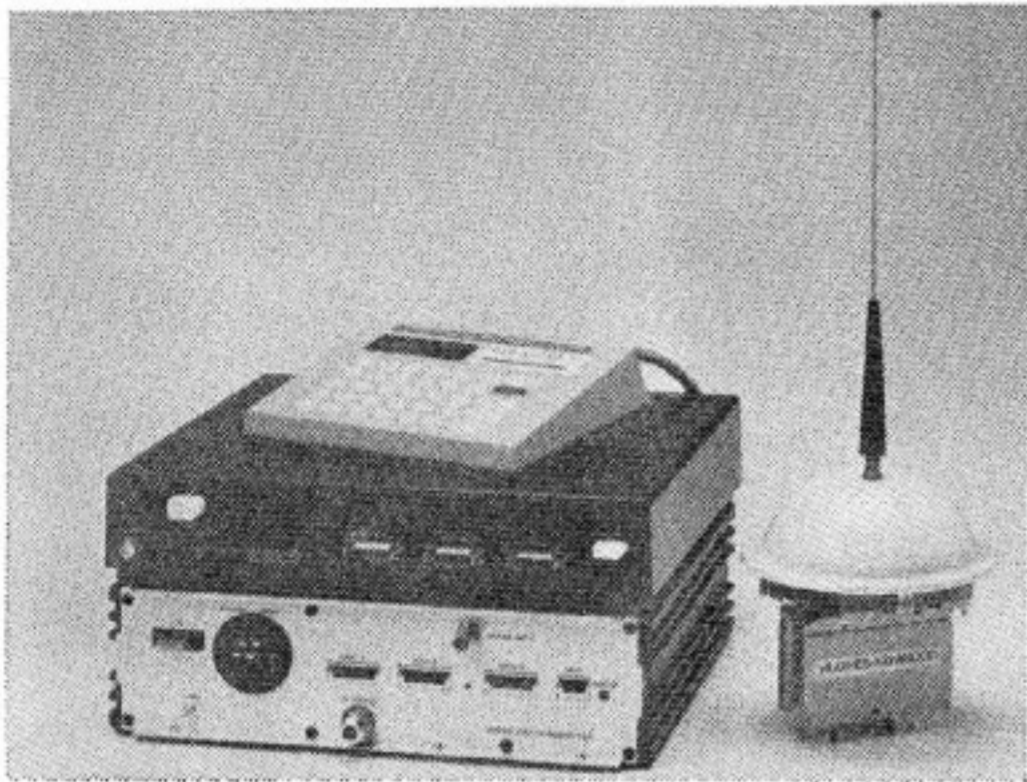
第23図に標準的な利用者局のブロック図を示す。この局は4つの基本ブロックから構成されている。

- ① Base Band Processor (BBP)
- ② Transmitter
- ③ Receiver
- ④ Serial-device Interface

Baseband Processor は受信機の復調部よりデータを受け取ったり、制御信号を送受信機のユニットに供給する役目をしている。送信部は BBP よりのデータと受信部よりのタイミング情報を受取り、8 Mbps の PN 符号拡散された BPSK 信号を送信する。第24図には現在市販されている System 2C 用の通信機の1例を示す。

(4) System 1

System 1 は1987年5月に、ARGOS 衛星 (第3.7章参

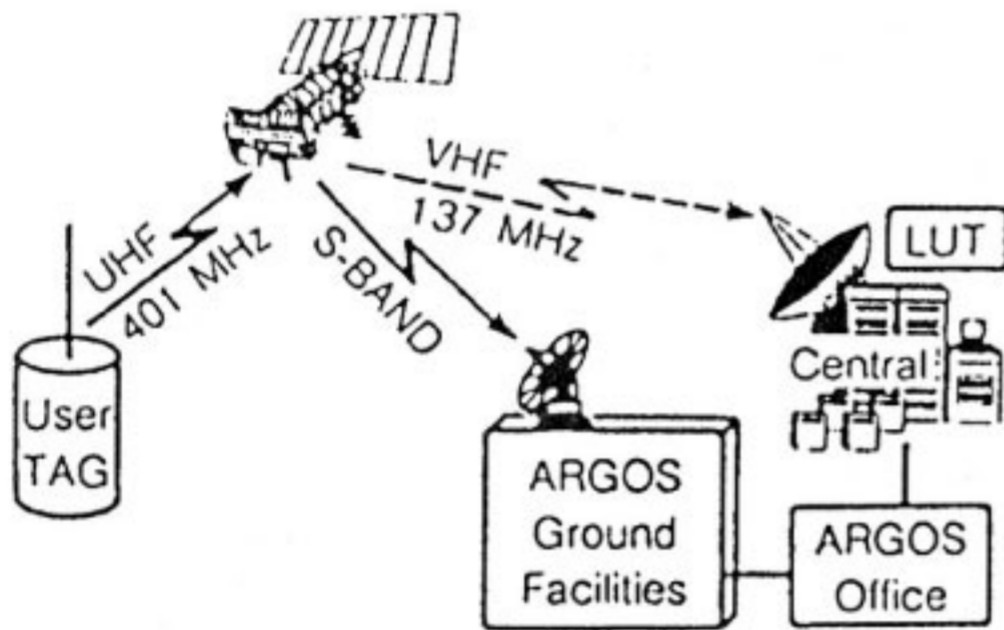


Hughes Model 2902 2-Way Satellite Terminal

第24図 GEOSTAR System 2.0 用通信機の一例

System 1

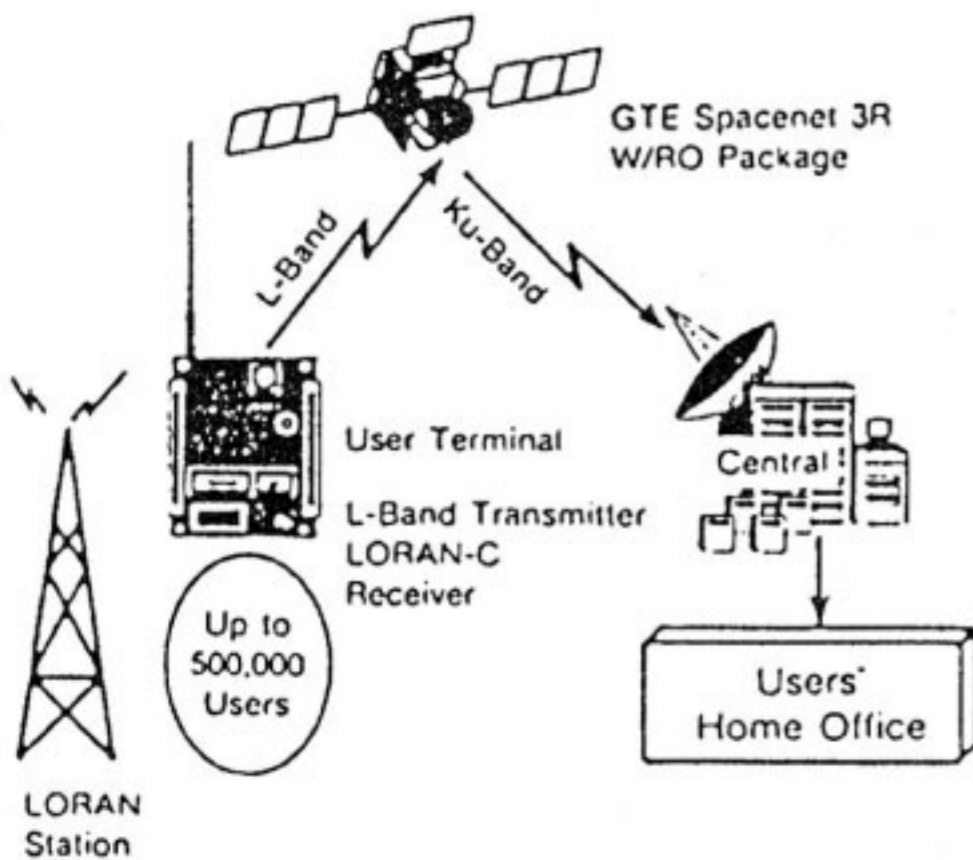
1987



第25図 GEOSTAR System 1 の概念図

System 2

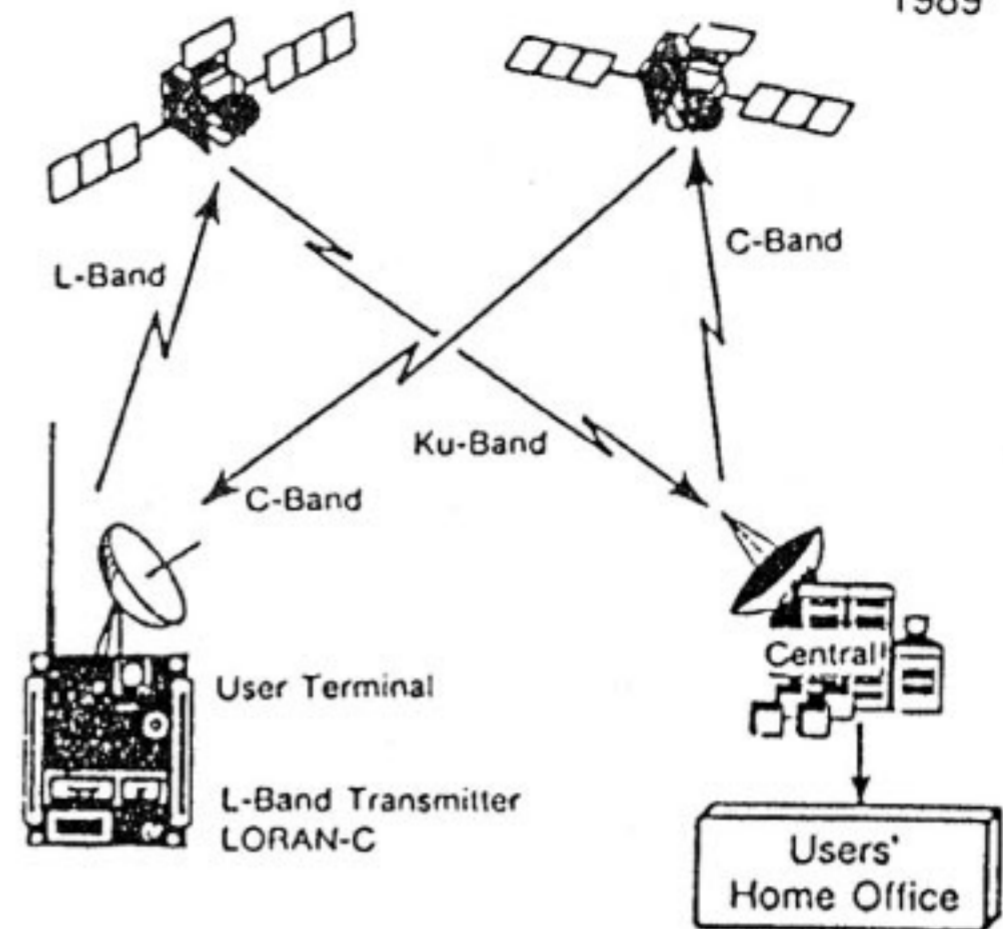
1988



第26図 GEOSTAR System 2 の概念図

System 2C

1989



第27図 GEOSTAR System 2C の概念図

照) を用いて開始された。このシステムはドップラー周波数偏移を利用した基本的な測位機能と、移動局から基地局への1方向のデータ伝送機能をもっており、トラック業界の限られた範囲で商用ベースで用いられている。現在も引続き利用されているが、システム構築が進むに従い廃止される予定である。第25図にシステム概念図を示す。測位精度は数 km で数時間おきにしか利用できない。

(5) System 2

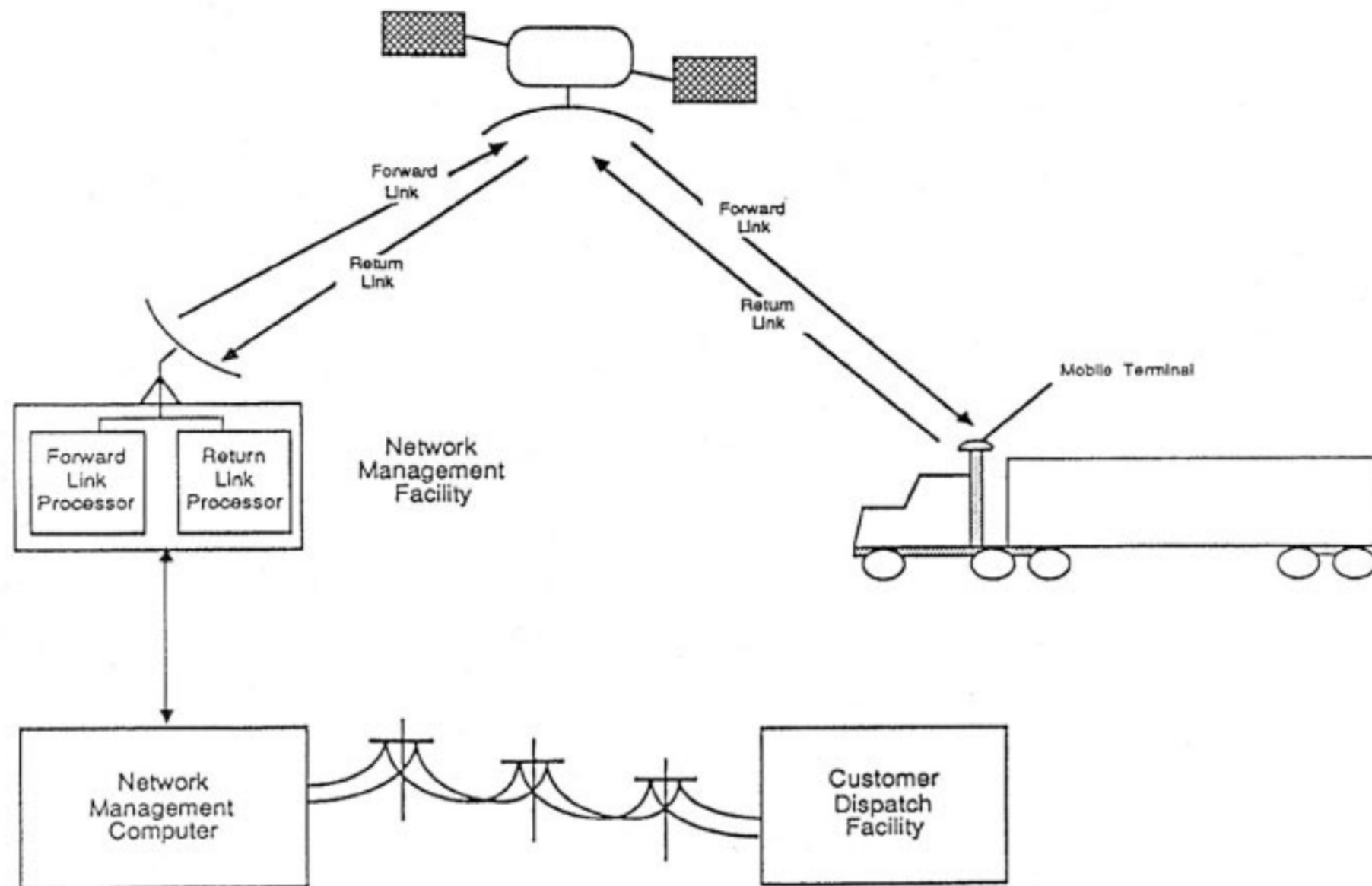
移動局から基地局方向への1方向の測位情報及びデジタル・メッセージの伝送システムである。システム概念図を第26図に示す。測位は LORAN-C を用い、宇宙部分は GTE SpaceNet 3R にパッケージとして搭載されている GEOSTAR RO-1 である。

移動局は、LORAN-C で得た測位情報(緯度、経度)を含む短いメッセージを自動的に送信する。オプションでキーボード表示部を追加すると100文字までのメッセージを送受信することができ、メッセージは表示部に表示される。

(6) System 2C

System 2 に、基地局から移動局向けの 5 GHz 帯 (Cバンド) の回線を持つ衛星を追加して双方向のメッセージ通信を可能としたシステムである。システム概念図を第27図に示す。測位は System 2 と同様に LORAN-C を用いているが、GPS 及び Transit (NNSS) による測位機能をもつ System 2G, System 2T の導入も計画しているが、これらは System 2C 用の機器と基本機能は同じである。

System Block Diagram



OmniTRACS™ System Overview

第28図 OmniTRACS システムの概念図

4.2 LOCSTAR⁽¹³⁾

GEOSTAR は最終的には System 4.0 として全世界的なシステム構築を目指しているが、ヨーロッパにも通信・測位複合システムを構築することでフランスの国立宇宙開発機関 (CNES) と合意し、1986年2月に調印した。1988年10月には CNES と GEOSTAR が各 15%、他のヨーロッパ諸国 8 カ国の計 25 機関が株式を所有する民間会社である LOCSTAR (商標) を設立した。

LOCSTAR はヨーロッパの地域的な通信・測位システムであるが GEOSTAR と完全に共用可能なシステムである。

EUTELSAT (European Telecommunications Satellite) と ITALSAT (Italian Telecommunications Satellite) が LOCSTAR 最初の衛星となり、1機に受信専用、他の 1機に送受信用のパッケージを搭載し、1991年から運用を開始する予定である。さらに、1995年にはサービス地域をアフリカ、中東へまで拡大 LOCSTAR 2 システムを構築する計画である。

4.3 OmniTRACS⁽¹⁶⁾

(1) 開発経緯

OmniTRACS は米国の Qualcomm 社が運用する通信・測位システムである。GEOSTAR や LOCSTAR と異なり、12 GHz 帯 (Ku バンド) を使用しているの

が特徴である。Qualcomm は 1985年7月に設立されたいわゆるハイテク企業で、前身はビタービ符号で有名な Dr. Andrew J Viterbi が設立した LINKABIT 社である。本社はカリフォルニア州サンディエゴにあり、従業員数は約 300 名である。Qualcomm は 1988年8月に総ての経営権を Omninet Corporation 社から買収するまで、同社の発注により移動体衛星通信システムの開発を行っていた。これが OmniTRACS システムであり、現在は Qualcomm 社の商標として登録されている。1988年7月から実験免許でサービスを行っていたが、1989年2月に事業免許を FCC より受けている。

(2) システムの概要

システム概念図を第 28 図に示す。宇宙部分は、現在静止軌道上にある GTE Gstar-1 に搭載された 12 GHz 帯の中継機 2 台 (各帯域 48 MHz) である。回線制御機能をもつ地上基地局は、直径 7.6 m のアンテナをもち米国のサンディエゴにある。利用者である移動局はほとんど長距離の大型トラックである。ハワイとアラスカを除く全米をサービス域とし、最大 2000 文字の双方向のメッセージ通信及び測位サービスを行っている。測位は LORAN-C を用い、精度は約 2 km 程度である。

主なサービスとしては以下のようなものがある。

- ① 業務用通信：住所、配送集荷物番号、時間等

- ② 現状報告 (Status Reporting)
- ③ 走行場所報告
- ④ 緊急通信

このシステムでは衛星と移動局の間の周波数に 14/12 GHz 帯 (Ku バンド) を使用しているのが大きな特徴であるが、その理由としては次の点があげられる。

- ① 1周波数帯で運用可能。
多くの現用衛星が Ku バンド中継機を搭載しておりシステムとしてバックアップが多くある。
- ② 安価で信頼性の高い指向性の移動局アンテナが得られる。
- ③ 指向性アンテナの採用により多重散乱や干渉の影響を低減できる。
- ④ 15 kbps という高速のデータ伝送が可能である。
Cバンドを用いると 1200 bps 程度である。
- ⑤ Ku バンドの衛星通信技術は完成度が高い。

Ku バンドは、2次業務を前提に 14.0-14.5 GHz が移動体衛星通信 (地球から宇宙) に割り当てられているが、宇宙から地球への割り当てはない。衛星から見ると固定局も移動局も区別はないとの実質的な判断により使用されている。

基地局から移動局方向の情報速度は約 5 kbps から 15 kbps までで、 $R=1/2$, $K=7$ の畳み込み符号で前方向誤り訂正の符号化を行う。BPSK あるいは OQPSK で変調されたデータは 5 kbps の情報速度で、1回線当り 2 MHz に周波数拡散 (ディスパーサル) された TDMA で伝送される。移動局から基地局へは 50 bps の情報速度で、1回線当り 1 MHz に直接周波数拡散された後、周波数ホッピング変調で 48 MHz に拡散される。これにより同時に 250 局まで収容可能である。

料金は、基本料金が \$ 35/月、通信料金は \$ 0.15/message + \$ 0.004/character である。

(3) 移動局

おもに大型トラックに搭載される移動局は大きく分けて次の3つの部分から構成される。

① 車外部分

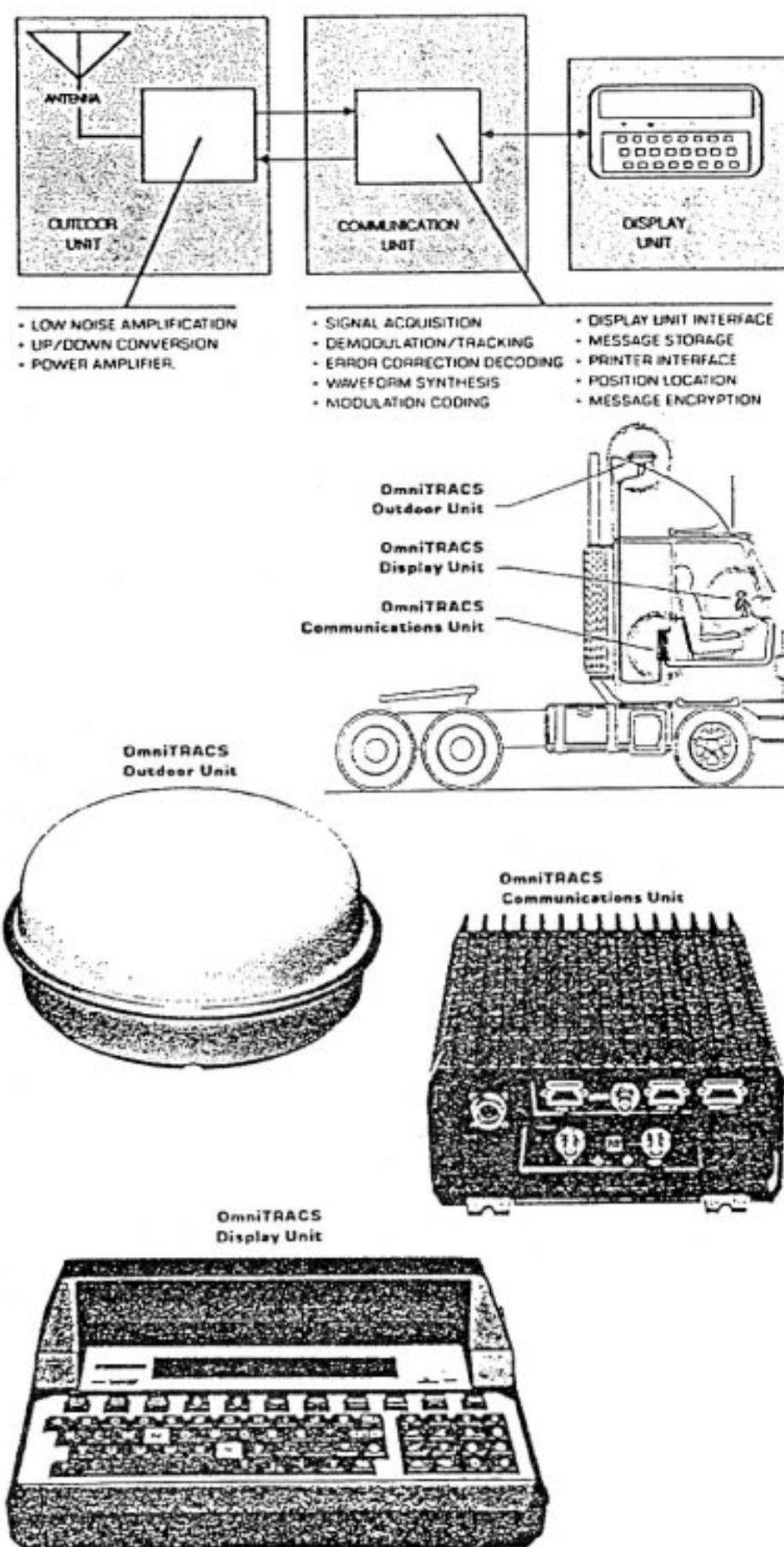
Ku バンドの追尾アンテナ、低雑音増幅器及びレドームを含み、直径 28 cm, 高さ 15 cm, 重量約 4 kg である。追尾は 3° ごとの 120 ステップで行う。

② 通信機部分

電源、信号処理部、シンセサイザー、LORAN-C 受信部などを含み、大きさは 20×20×10 cm 程度、重さは約 6 kg である。

③ 表示部分

4行、40文字の液晶表示部と種々の特別な機能を持つキーボードを有する。



第29図 OmniTRACS 用の通信機の例

大きさは 25×15×3 cm 程度、重さは約 5 kg である。

第29図に移動局装置の概観と取り付け場所を示す。

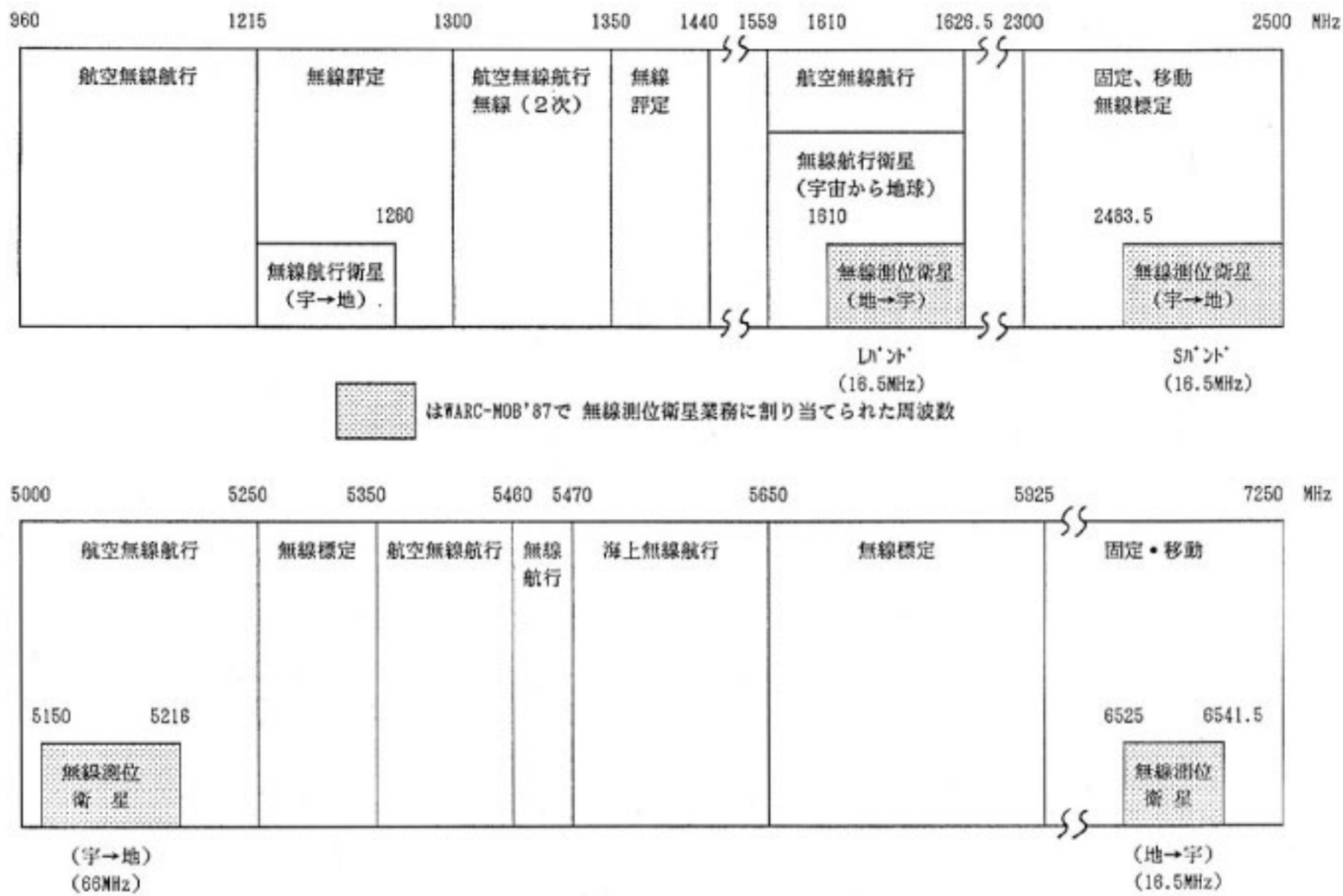
5. 周波数割り当てからみた無線測位衛星システム

5.1 無線測位衛星の定義と問題点

国際電気通信連合 (ITU) で定められている無線通信規則には無線測位に関連して次のような用語が定義されている。

1. 無線測位 (Radio Determination)
電波の伝搬特性による物体の位置、速度その他の特性の決定又はこれらの諸元に関連する情報の取得。
2. 無線航行 (Radio Navigation)
航行のために使用する無線測位 (障害物の測位を含

第5表 無線測位業務に割り当てられている周波数（1部分）



む)。

3. 無線標定 (Radio Location)

無線航行の目的以外のために使用する無線測位。

これによると、「無線測位」が無線による測位を一般的に定義し、その特別な使用目的として「無線航行」や「無線標定」が定義されていると解釈できる。さらに、他の目的のため各種の業務 (service) が定められている。特に衛星を用いた無線測位業務は「無線測位衛星業務 (Radio Determination Satellite Service ; RDSS)」として定義されている。

これらの測位業務を行うための周波数帯が無線通信規則に定められている。低い周波数帯では、9-14 kHz (無線航行業務) から高い周波数帯では 252~265 GHz (無線航行, 無線航行衛星業務) まで多くの周波数帯が割り当てられている。

先に述べたように、従来無線測位は航法 (Navigation) を主目的とし、通信 (Communication) とは独立したシステムとして発展してきたため、無線通信規則においても測位業務用と通信業務用の周波数帯は明確に分離されている。近年、通信と測位を複合させた衛星通信システムの研究開発が進み一部のシステムは実運用される段階にきたが、このサービスを通信業務とするか測位業務とするかで周波数割当が異なってくる。逆に、使用する周波数が決まっている場合に無線局免許は通信業務用か測位業務用か異なる。建前としては両者を同時にサービスすることは法制上認められないことになってい

る。

衛星系の通信・測位複合システムを構築しようとする場合、当然通信と測位は同じ周波数 (帯) を用いるのでいずれかに割り当てられている周波数帯を使用することになる。さらに測位を必要とする局は一般に移動局であるから移動衛星業務用の周波数帯を用いることが一般的であり、この点から現在、陸海空の移動局との通信業務に割り当てられている 1500 MHz 帯 (Lバンド) の周波数か、この近くの周波数帯を使用するのが技術的にも有利と考えられる。しかし、すでに述べたように法制上は問題がある。

5.2 周波数の再配分⁽¹⁷⁾

測位と通信を複合した新しい衛星通信システムの構築には前節で述べような法制上の問題があることが世界的に指摘され、1987年に開催された移動通信に関する世界無線通信主管庁会議 (WARC-MOB '87) では無線測位衛星業務用の周波数の再配分が大きな問題として議論された。

第5表に、無線測位に配分されている周波数帯 (1部分) を示す。ハッチ部分が WARC-MOB '87 で新たに「無線測位衛星業務」に割り当てられた周波数帯である。衛星から移動局へは 1610.0-1626.5 MHz (Lバンド), 移動局から衛星へは 2483.5-2500 MHz (Sバンド) で各々 16.5 MHz が割り当てられた。しかし、優先権のある1次的基礎 (Primary Basis) での配分は、GEOSTAR システムを積極的に支持する米国を含む第

2地域 (Region 2) だけで、他の地域は原則的に2次的基礎での配分である。

新たに「無線測位衛星業務」に周波数が配分されたとは言え、まだ大きな問題は残っている。前節で述べたように「無線測位業務」では“通信”が行えないことである。このため、米国は WARC-MOB '87 において、「無線測位衛星業務」を定義している「無線通信規則第 35 条」に「移動に密接に関係のある通報及び通信」も提供できることを追加する旨の提案を行ったが、総会では採択されなかった。

米国の主張が、移動体衛星通信との差異が明確でないことと、あまりにも GEOSTAR システムを念頭においたものであったためとおもわれるが、通信・測位複合システムの今後の発展のためには残念なことであり、引続き世界的な論議が求められよう。

6. 世界各機関の動向

6.1 国際電気通信連合 (ITU)

第 5 章で述べたように、世界無線通信主管庁会議では周波数の再配分や測位業務の定義拡大をめぐり活発な議論が展開されている。

ITU の常設機関である国際無線通信諮問委員会 (CCIR) では、第 8 研究委員会 (SG-8) が移動、無線測位関連の技術的検討を所掌している。しかし、現在はその中間作業班 (IWP8/14) において、「通信」を主体とした航空、海上及び陸上移動衛星業務に関する技術・運用等についての検討が主になされており、「通信・測位」については情報文書 (Information Paper) が提出される程度である。

6.2 国際民間航空機関 (ICAO)

1983 年 11 月の ICAO 理事会で、将来の航空航法システム (FANS; Future Air Navigation System) 特別委員会が設置され、1988 年 5 月の 4 回の委員会において航空衛星システムを核とした 2010 年における航空航法システムの通信 (C; communication), 航法 (N; Navigation), 監視 (S; Surveillance) の概念が確立された。これを分類すると次のようになる。

C (通信)

- ATC (航空交通管制) Air Traffic Control
- AOC (運航管理通信) Aeronautical Operational Communications
- AAC (航空業務通信) Aeronautical Administrative Communications
- APC (航空公衆通信) Aeronautical Passenger Communications

N (航法)

S (監視)

ADS (自動従属監視) Automatic Dependent Surveillance

CIS (協調独立監視) Cooperative Independent Surveillance

N (航法) は、文字通り航法システムを言う。航空機に搭載されている慣性航法装置 (INS) が代表的なシステムである。本論文で述べた、NAVSTAR/GPS や NAVSAT 等の無線測位衛星システムはこの範ちゅうに分類される。

S (監視) は、位置を含めた航空機の運航情報を基地局で監視する機能を言うが、現在のシステムでは地上のレーダが代表的なシステムである。

ADS (自動従属監視) は、航空機が自らの航法システム (例えば INS) に依存して位置情報を得て基地局へ伝送し、基地局が監視するシステムである。GPS 等を用いて得た位置情報を衛星経由で地上基地局へ伝送して監視するシステムはこの範ちゅうに分類される。ICAO でも検討されているが、GPS が米国防省により運用され測位精度を自由に落とせることに強い懸念を示している。

CIS (協調独立監視) は、航空機自身の航法システムを用いず、他のシステムから協調的に位置情報等を得て基地局へ伝送し、基地局で監視するシステムである。GEOSTAR に代表されるシステムの利用がこの範ちゅうにはいるが、GEOSTAR は (通信) も含んでいるため、CNS を総合したシステムと言えよう。

ICAO でも GEOSTAR タイプの衛星システムの検討をしているが、双方向の通信のため周波数利用効率がよくないとの立場をとっている。

6.3 国際海事機構 (IMO)

IMO では全世界的な海事救難衛星システム (GMDSS; Global Maritime Distress Satellite System) が検討されている。この議論のなかで GPS システムの採用等に伴う技術的検討がされている。しかし、基本的に捜索救難システムは一般の通信や測位システムと同列に論じることには無理がある。このようなことから、現在の主な検討課題は、世界的な衛星系捜索救難システム (EPIRB) である COSPAS/SARST の GMDSS としての技術要件の検討であり、通信・測位システムについてはまだ大きな関心は向けられていない。

7. おわりに

測位衛星システムについて、世界の開発動向とシステムの概要について述べた。測位と通信は従来、別個のシステムとして発展してきたが、近年世界各国各機関で無

線航行衛星システム,さらには測位と通信を複合した衛星システムの研究開発が進められている.一部はすでに初期運用され,1990年中頃には本格的な通信・測位衛星時代が到来すると期待される.しかし,本論文で述べたように,周波数配分上の問題,測位業務の定義など解決すべき検討課題は多い.

将来は,通信と測位の区別なく,また航空,海事,陸上の区別なくサービスが可能な衛星通信システムの構築が望まれる.古代人が「測位」のために眺めた星は,誰へだてなく光をあてた.今日の星,衛星も同様であるべきであろう.

参 考 文 献

- (1) 木村小一,「衛星航法」,海文堂出版,昭和52年
- (2) 編者・日本測位学会,「GPS—人工衛星による精度測位システム—」,日本測量協会,1986.
- (3) 下世古幸雄,“全世界測位システム(GPS)を利用した高精度測位”,電気通信時報,1978.3.
- (4) 緒方勇,木村小一,“衛星航法 NAVSTAR/GPS とその利用”,「漁船」第273号,昭和63年2月,漁船協会
- (5) 木村小一,「衛星航法システム・無線測位衛星システム」関連論文集,ISCS セミナー資料,(財)国際衛星通信協会
- (6) Aviation Week Space Technology, January 25, 1988
- (7) 木村小一,船舶電子航法ノート(142),「船の科学」,Vol. 42, 1989年3月.
- (8) I. D. Kitching, S. A. Dale and Dr. P. Daly, “Potential for a united GLONASS/NAVSTAR civil navigation system”, IEE 4th International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation”, pp. 181-185, London, Oct. 1988.
- (9) Dr. L. Ott, “The Starfix satellite navigation system”, IEE 4th International Conference on Satellite Systems for Mobile Communications and Navigation, pp. 208-213, London, Oct. 1988.
- (10) D. Ludwig and B. Esther, “ARGOS Project: Localization and Data Collection Program Design of the TIROS-N Random Access System”, 27th International Astronautical Federation (IAF '76), California, Oct. 1976.
- (11) 「通信・測位複合サービス調査研究会報告書」,(財)電波システム開発センター,昭和63年3月
- (12) G. K. O. Neill and Leslie O. Snively, “The GEOSTAR position determination and digital message system Conf, pp.312-314, 1983.
- (13) “Understanding Radio Determination Satellite Service”, Geostar, May 1989.
- (14) Aviation Week & Space Technology, December 19, 1988.
- (15) 西周次,“民間用測位・通信衛星 GEOSTAR システムについて”,電子通信学会誌,vol.69, No.7., 1986.
- (16) OmniTRACS System Overview, Qualcomm, Inc., 1989.9.5.
- (17) 電気通信時報,1988.2.

この他に多くの文献を参照した.特に,元運輸省電子航法研究所の木村小一氏は測位関係の多くの書籍・論文及び資料を書かれており貴重な資料として参照させて頂いた.

一般に入手しにくい資料として,郵政省電気通信審議会の航空無線委員会及び海上無線通信委員会の資料も参照した.また,各システムを提供している,あるいは提案している各機関のパンフレット類,担当者との直接面談による質疑応答による情報も貴重な資料として使用した.

