

陸上移動衛星通信用アンテナ追尾方式

山本 伸一^{*1} 田中 健二^{*1} 若菜 弘充^{*1}
大森 慎吾^{*2}

(1994年9月14日受理)

AN ANTENNA TRACKING METHOD FOR LAND-MOBILE SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEM

By

Shin-ichi YAMAMOTO, Kenji TANAKA, Hiromitsu WAKANA,
and Shingo OHMORI

This paper describes an antenna tracking method for cars using L-band mobile satellite communication systems. This method uses an open-loop control technique using both a fiber-optic gyroscope (FOG) and a geomagnetic compass (MC) to determine the direction of a moving car. A FOG can determine the angular velocity precisely but accumulates errors. A MC can determine the absolute direction but is sometimes affected by magnetic disturbances from bridges and moving lorries. The two sensors compensate such disadvantages in each other, providing for precise and stable control. Field experiments using an L-band phased-array antenna of 13 dBi gain with only azimuthal control of the antenna beam direction showed a good tracking performance.

[キーワード] 陸上移動衛星通信, アンテナ追尾, 追尾アルゴリズム, 光ファイバジャイロ.

Land-mobile satellite communications, Antenna tracking, Tracking algorithm, Fiber-optic gyroscope.

1. ま え が き

航空機, 船舶, 自動車等を対象とした移動体衛星通信システムの研究開発が, 世界各国で進められており, アメリカ, カナダおよびオーストラリアでは専用の国内衛星を用いた移動体衛星通信の商用サービスが予定されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾. これらは, 主に自動車を代表とする陸上動体を対象としており, 周波数にはLバンド(1.5 GHz帯)が用いられる. 自動車に搭載される衛星通信装置は, 大きさ, 重量, 消費電力等の制約を受けるため, 品質の良い音声通信や高速データ通信等を行うには, 利得の高いアンテナを用いて十分なシステムの性能を得ることが必要となっている. このため, 車載用高利得アンテナは, 陸上移動衛星通信システムの構築において最も重要な要

素技術の一つになっており, 世界各国の各機関において研究開発が進められている⁽⁴⁾⁽⁵⁾. また, 移動体に高利得アンテナを搭載した場合には, 移動体の動きに応じてアンテナのビームを衛星方向に指向させるアンテナ追尾機能が必須となり, このアンテナ追尾技術もシステムの性能に関わる重要なものとなっている⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾. 車載用高利得アンテナ駆動方式には, アンテナをモーター等の機械系によって回転させる機械式とフェーズドアレイアンテナのように電子的にビームを任意の方向に形成する電子式が開発されている⁽⁴⁾⁽⁸⁾. アンテナ追尾の制御方式(以下, 追尾方式と略記する)には, 衛星から送信される信号の受信レベルなどを用いるクロズドループ方式と移動体に方位測定センサを搭載し, それから得られる方位角情報(例えば, 移動体の進行方向方位角)から衛星方向が求まるオープンループ方式がある⁽⁹⁾. しかし, アンテナ追尾アルゴリズムについては, 詳細に報告された例

^{*1} 関東支所 宇宙通信技術研究室

^{*2} 企画部 企画課

がほとんどない。

移動体におけるアンテナ追尾は、航空機や船舶における追尾に比べ、次に挙げる理由により難しい。

- (1) 樹木、建物などによるシャドウイングおよびブロッキングの発生。
- (2) 移動体の動きが機敏。右左折が頻繁に起こる。
- (3) 人工構造物による磁気的外乱の発生。

これらの問題点と追尾方式の特徴および車載アンテナや追尾センサ等の追尾系の性能を総合的に検討した結果、陸上移動体に用いるアンテナ追尾システムの追尾方式には基本的に衛星からの信号を用いないオープンループ方式が適しているという結果を得た。

本論文では、この検討結果に基づいて、オープンループ方式のLバンド陸上移動衛星通信用アンテナ追尾方式を提案する。開発したアンテナ追尾システムでは、方位測定センサとして光ファイバジャイロと磁気方位計を用い、それぞれのセンサが持つ欠点をお互いに補う追尾アルゴリズムを開発することで、一般の走行環境下において良好なアンテナ追尾を可能にした。

本論文の2章ではアンテナ追尾方式について、先に述べた2つの追尾制御方式を検討し、その特徴と陸上移動体の走行環境から、陸上移動に適した追尾方式の提案を行う。3章ではアンテナ追尾システムの構成および追尾アルゴリズムについて、4章では実際に走行追尾実験を行った結果について述べる。また、5章では、走行時の自動車の挙動がアンテナ追尾に与える影響について考察する。

2. アンテナ追尾方式の検討

アンテナ追尾方式におけるクローズドループ方式とオー

ブンループ方式の特徴の概略を第1表に示す。

クローズドループ方式には、アンテナのビームを衛星方向を中心に走査したときに得られる衛星信号の受信レベルの変化を用いるステップトラック方式、衛星方向に対して対称においた2つのビームを交互に切り替えたときに得られる受信レベルの差とアンテナパターンを用いるビームローピング方式および複数のアンテナビームによって得られる受信信号の位相情報を用いるモノパルス方式等がある⁽⁷⁾。このように、クローズドループ方式は、基本的に衛星信号を用いることから、衛星が見通し状態であることが必要条件となる。また、自動車等の陸上移動体に搭載するアンテナは、大きさや形状等の制限を受けることから、実用的なシステムを考えた場合、あまり複雑な構造のものを用いることができない。このため、追尾方式にはステップトラック等のアンテナのビームを走査する方式が用いられると考えられる。本論文で述べるクローズドループ方式にはステップトラック方式を用いた。

オープンループ方式では、移動体に搭載した追尾センサからの情報によって、移動体から見た衛星方向を把握し、アンテナの方向を制御する。追尾センサには、磁気方位計やジャイロなどの方位測定センサがある。また、最近の研究開発によって機械部分を持たない振動ジャイロや光ファイバジャイロが一般に入手可能になっており、取扱いの簡便さ、低価格化から車載用の追尾センサとして手軽に利用することができるようになった。

次に陸上移動に適した追尾方式の検討を行うにあたり、1章で述べた移動体の走行環境における問題点について考察する。

- (1) 走行する道路周辺の樹末や建造物等によって衛星か

第1表 追尾方式の分類と追尾センサ等の性能および特徴

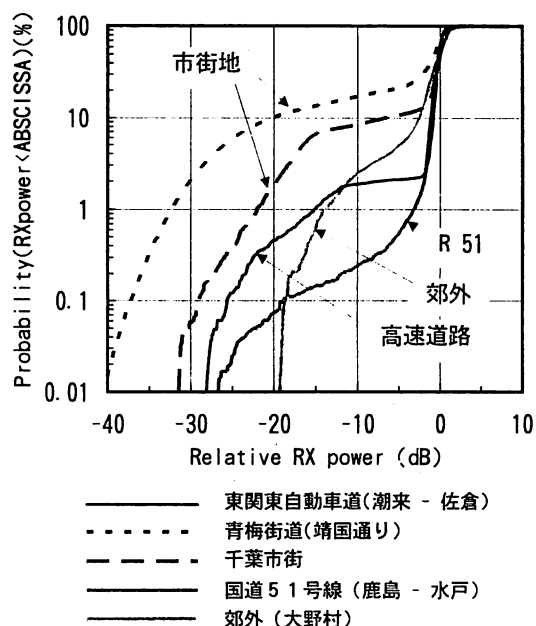
追尾方式	センサ	測定精度	応答速度 (最小)	応答範囲 (最大)	特 徴
					○：長所 ●：短所
オープン ループ 方式	光ファイバ ジャイロ	0.01°/sec 程度	10msec	±100°/sec	○測定精度が高い ○走行環境に影響されない ●絶対方位が測定できない ●累積誤差の発生
	磁気方位計	約±1°	連続的	内部回路の 速度に依存 (フラックス ゲート型)	○価格が安く、簡便 ○絶対方位が測定できる ●周辺の環境に大きく影響される (磁気的外乱に弱い)
		追尾形式	追尾方法		
クローズ ドループ 方式	ステップ トラック	アンテナの走 査による受信 レベルの変化	ハード・ソ フトの動作 速度に依存	通常の走行で 発生する回転 角速度程度 約30°/sec	○追尾センサが必要ない ○初期衛星捕捉が容易 ●レベル変動が不可避 ●樹木や建物等で衛星信号が遮断された とき衛星を見失う(再捕捉が必要) ●追尾アルゴリズムが複雑になりやすい
	ビーム ローピング	2方向にビー ムを切り替え たときの受信 レベル差			

らの信号が頻繁に減衰あるいは遮断される。

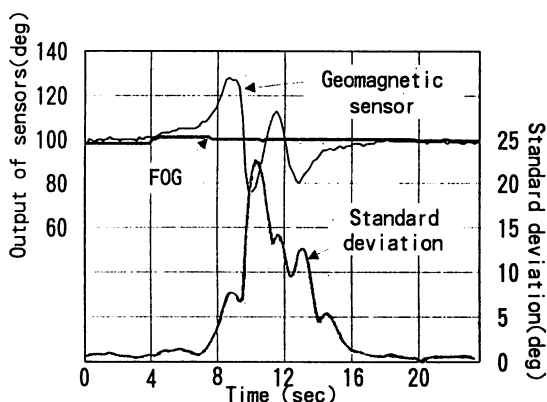
これらは、シャドウイングあるいはブロッキング（以下、シャドウイングと略記する）と呼ばれる。シャドウイングが発生すると、衛星信号の受信レベルは減衰、変動あるいは消失する。このため、衛星回線は遮断状態あるいは非常に不安定な状態となり、クローズドループ方式では衛星を見失うことになる。第1図は異なった走行環境における衛星信号の受信電力の累積確率分布の一例である。横軸は見通し時の受信電力を 0 dB としたときの相対受信電力、縦軸は受信電力が横軸の値を下回る確率である。図では相対受信電力が -2~-4 dB 付近で曲線の傾きが変化している。この -4 dB 以上の特性は、直接波と周囲からの反射波との合成によるライス分布を表しており、それ以下ではシャドウイングの影響を表している。道路周辺に大規模な建造物が密集する都市部では、シャドウイングの発生確率は全走行時間に対して 10~20% あり、シャドウイングがクローズドループ方式のアンテナ追尾において大きな問題となることが分かる。一方、オープンループ方式では、基本的に衛星信号を用いないので、シャドウイングはアンテナ追尾に影響を与えない。

(2) 航空機や船舶等の移動体に比べ動きが機敏であり、右左折などによる大きな方位角方向の変化が頻繁に発生する。

自動車の一般走行では、右左折によって 90° 程度の方位角の変化が頻繁に発生する。この時の回転角速度は



第1図 受信信号電力の累積確率分布



第2図 磁気的外乱の影響

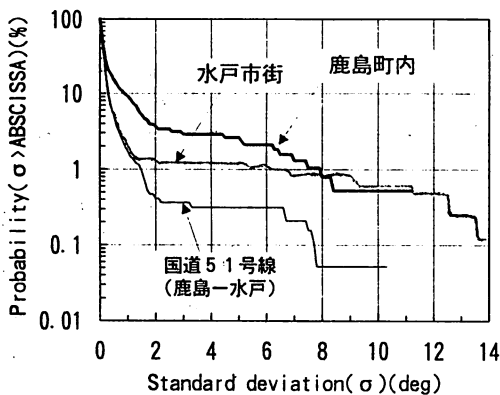
最大で 30°/sec 以上にもなり、アンテナを精度良く衛星方向に指向させるためには、移動体の動きが機敏であるほど高速なアンテナ追尾制御が必要となる。例えば、アンテナ追尾精度をビーム半値幅程度とすると、利得が 13 dBi, ビーム半値幅 ±14° 程度のアンテナを使用した場合、アンテナ追尾精度は 14° となる。したがって、自動車の最大回転角速度として 30°/sec を考慮すると、1 秒間に 2 回以上のアンテナ方向の制御が必要となる。また、クローズドループ方式では、ステップトラック方式のようなビーム走査型を用いた場合、さらに高速なアンテナ方向の制御が要求される。

オープンループ方式では、自動車の動きに追従できるために、十分な応答速度および応答範囲を持つ追尾センサが必要である。

(3) 走行する道路周辺の人工構造物による磁気的外乱の影響

オープンループ方式では、追尾センサにより移動体の進行方向の方位角を測定する。方位角を測定するセンサには磁気方位計や航空機などで用いられるジャイロシンコンパスインディケータがある。磁気方位計は取扱いの簡便さや低価格であることから、オープンループ方式の追尾センサとして最適であると考えられるが、磁気的外乱の影響を受けやすい欠点がある。第2図は、自動車就一定方向に進行中の時の磁気方位計と光ファイバジャイロ（以下、FOG: Fiber Optic Gyro と略記する）の出力結果である。図のように、磁気的外乱によって磁気方位計の出力が大きく乱されることが分かる。

図下側は、磁気方位計の出力の 2 秒間（約 16 個）のデータから求めた標準偏差である。これは、磁気的外乱を引き起こす人工構造物に対して移動体がある程度の速度で移動する場合、測定した方位角が大きく変動するため、データのばらつき（標準偏差）から磁気的外乱を検



第3図 異なった走行環境における磁気的外乱の発生頻度

出できることを示している。第3図は、異なった走行環境における磁気的外乱の発生頻度について示したものである。ここでは、第2図に示したように磁気方位計の2秒間の測定データの標準偏差 σ を用いて、 $\sigma > 1^\circ$ を磁気的外乱が発生しているとした。図より、人工建造物の多い都市部でも $\sigma > 1^\circ$ の確率は、全走行時間の10%以下となっており、その発生頻度はあまり高いことが分かる。なお、本測定データには右左折による方位方向の変化も含まれているため、実際の発生頻度は、全走行時間の数%程度と推察される。図で suburban での σ が比較的大きいのは、車の右左折の頻度が他より多いためである。また、都市部では、停車中に定常的な磁気的外乱を受けた場合、 $\sigma < 1^\circ$ となる可能性もあるが、全走行時間からみると希である。

以上のように、陸上移動体の走行環境は、アンテナ追尾を行う上で数々の問題を含んでおり、特にシャドウイングの発生と移動体の機敏な挙動は重要な検討課題である。

これらの問題に対して、オープンループ方式は、

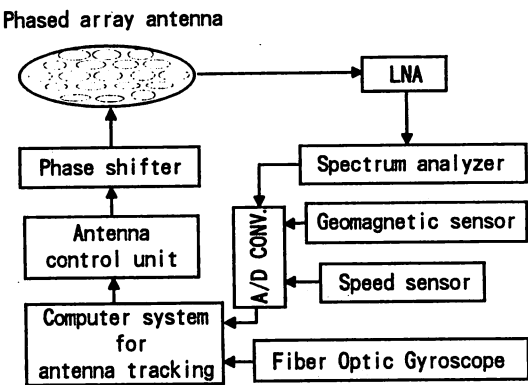
- (1) シャドウイングの影響を受けない。
- (2) 移動体の機敏な挙動に対してシステムが十分な応答速度および応答範囲を持つことが可能。
- (3) 磁気的外乱の検出、あるいは磁気的外乱の影響を受けない追尾センサを用いて、その影響を除去できる。

といった特徴を有しており、陸上移動のアンテナ追尾方式に適していると考えられる。

3. アンテナシステムの構成と追尾アルゴリズム

3.1 アンテナシステムの構成

第4図は、アンテナ追尾性能を評価するために用いたアンテナシステムの構成である。ここで、アンテナシステム（以下、本システムと略記する）とは、追尾系とア



第4図 アンテナシステムの構成

第2表 車載用フェーズドアレイアンテナ主要諸元

周波数	受信 1540.5MHz~1548.0MHz 送信 1642.5MHz~1650.0MHz
偏波	左旋円偏波
走査角	仰角 30° ~ 90° (1° ステップ) 方位角 0° ~ 360° (")
利得	約 13dBi (仰角 45° : LNA入力)
ビーム半値幅	約 ±14°
G/T	-15dBK (仰角 45°)
システム雑音温度	約 340° K
軸比	約 5dB (仰角 45°)
大きさ	60cmφ × 4cm(H)
重さ	約 6kg

ンテナ系を合わせた総称である⁽¹⁰⁾。第1図に示した受信電力の累積確率分布のデータは、本システムを用いて取得したものである。

追尾系は、追尾用計算機（追尾アルゴリズム）、追尾センサ（磁気方位計、FOG）、車速センサおよびスペクトラムアナライザ（以下、スペアナと略記する）で構成され、追尾アルゴリズムの変更によってオープンループ方式、ステップトラック方式によるクローズドループ方式およびこれらの併用方式でアンテナ追尾実験を行うことが可能である。スペアナは、衛星信号の受信電力レベルを測定するためのものである。

アンテナ系は、19素子のフェーズドアレイアンテナ、アンテナ制御部および LNA で構成されている。アンテナは、利得 13 dBi (仰角 45°)、ビーム半値幅 ±14° で、任意の方向に高速にビームを形成することが可能である。第2表にアンテナの主要諸元を示す。

尚、本システムでは、アンテナのビーム幅が広いことから方位角方向のみの追尾を行い、仰角方向の追尾は行っていない。また、本システムのアンテナ追尾精度は車載

アンテナのビーム半値幅 (14°) 程度を目標とした。

3.2 オープンループ方式

本システムは、オープンループ方式による追尾を行うために、磁気方位計と FOG の 2 つのセンサを搭載し、それぞれ移動体の進行方向の方位角および相対回転角度を測定している。

FOG は、サニャック効果 (閉じた光路を反対方向に伝搬する 2 つの光の伝搬時間、すなわち位相が閉光路の回転角速度に比例して変化する現象) を利用した機械部分を持たないジャイロであり、高精度に回転角速度を測定できる光ファイバセンサである⁽¹¹⁾。近年、研究開発が進みカーナビゲーション等の方位測定センサとして用いられている。FOG は磁気的外乱の影響を受けないこと、応答速度が速く、且つ応答範囲が広いことから、陸上移動の走行環境に適したセンサと考えられる。しかし、絶対方位が測定できないこと、角速度を積分して相対回転角度を得るため測定誤差が累積し、長時間の使用ではそれが大きな誤差となる欠点がある。この欠点を磁気方位計を併用して補償する方式が、ここで提案するアンテナ追尾方式である。

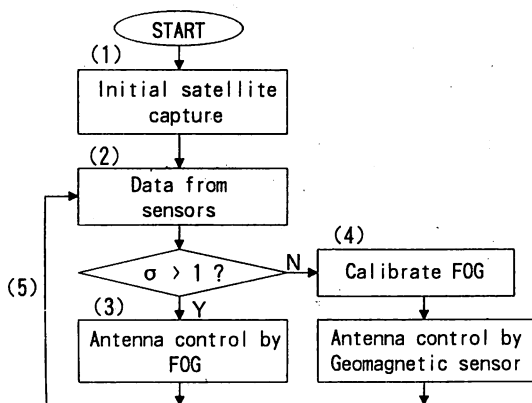
第 5 図は、オープンループ方式における追尾アルゴリズムのフローチャートである。以下、本追尾アルゴリズムの処理の流れについて述べる。

(1) 衛星初期捕捉

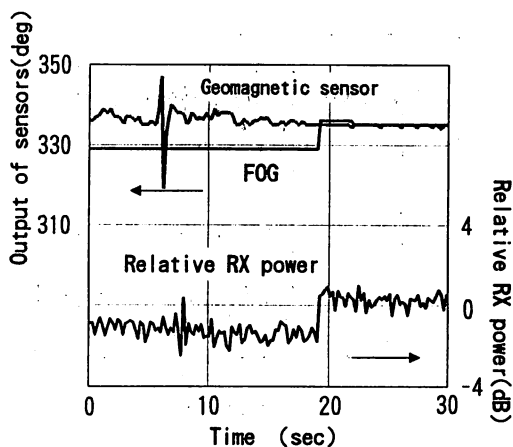
初期衛星捕捉は、磁気方位計が測定した移動体の進行方向の方位角を用いて行う。初期捕捉精度は、磁気方位計の測定精度による。また、このときの方位角は FOG の方位角の初期値となる。

(2) FOG、磁気方位計および車速センサからそれぞれ測定データを読み込む。磁気方位計の測定データは常に統計処理される。

(3) 磁気方位計の測定データの標準偏差 σ がしきい値



第 5 図 追尾フローチャート (オープンループ方式)



第 6 図 累積誤差の修正

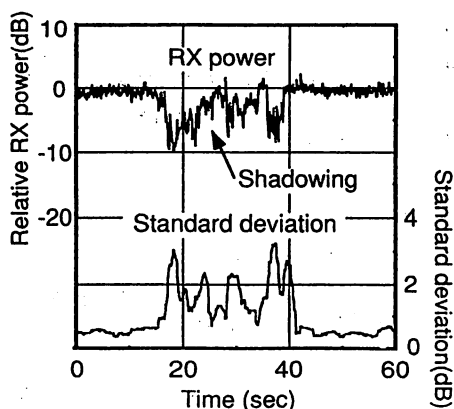
($0.8 \sim 1^\circ$) 以上のときは、磁気的外乱が発生している。あるいは移動体が右左折をしていると判断し、FOG の測定データを基にアンテナの角度制御を行う。

- (4) 標準偏差 σ がしきい値以下のとき、その測定データは正しいと判断し、そのデータを基にアンテナの角度制御を行うとともに、FOG の累積誤差の修正を行う。
- (5) 以下、(2)~(4)を繰り返す。

FOG の累積誤差の修正とは、磁気方位計の測定した方位角データが、磁気的外乱に影響されずに正しいと判断されたとき、その方位角を新たな基準として FOG に与え、これまでに累積した誤差をクリアすることで、本追尾アルゴリズムの特徴的な部分である。第 6 図は、累積誤差の修正の様子を示したものである。上段の磁気方位計と FOG の測定データには約 7° の差があり、これは、主に FOG の累積誤差と考えられる。ここで、磁気方位計の測定した方位角データの標準偏差 σ が、 $\sigma < \text{しきい値}$ となったとき、そのデータを FOG の新しい方位角の初期値とすることで、FOG の累積誤差をクリアしている。その結果、下段に示す受信電力は約 2 dB 上昇しており、本処理が有効であったことを示している。磁気方位計からは、一般の走行環境下では高い確率で正しいと判定される方位角が得られるため、FOG の累積誤差の修正を頻繁に行うことが可能である。したがって、本追尾アルゴリズムを用いた場合、2 章で述べた陸上移動における問題点の影響を受けにくいアンテナ追尾システムを構築することが可能である。

3.3 オープンループとクローズドループの併用方式

3.2 節のオープンループ方式における磁気方位計の代わりに、受信レベルの情報を用いるオープンループとクローズドループの併用方 (以下、併用方式と略記する) も有効なアンテナ追尾方式である。これには次のような



第7図 シャドウイングの判定

特徴がある。

長所

- (1) 追尾センサを搭載するため、シャドウイングの影響を受けない。
- (2) 見通し時は、受信レベルの情報から正確な衛星方向の推定が可能である
- (3) 大きな角速度が発生した場合は、追尾センサの情報で追尾を行うため、クローズドループ方式のみの場合に比べてアンテナ制御能力が低くてもよい。

短所

- (1) 追尾センサと衛星信号の受信レベルを測定する機能の両方が必要である。
- (2) 衛星方向の推定のために、アンテナのビーム走査する方式を用いた場合、受信レベルの変動が不可避である。

磁気方位計において磁気的外乱を判定する必要があるように、併用方式ではシャドウイングの発生の有無を判定する必要がある。第7図に受信レベルとその標準偏差 σ を示す。ここでも同様に $\sigma > 1$ dBでシャドウイングの発生を検出できることが分かる。

オープンループ方式と併用方式の追尾精度の優劣を決める主な要因は、磁気的外乱とシャドウイングの発生頻度の差である。これは走行環境に依存するが、第1図から得られるシャドウイングの発生確率と第3図から得られる磁気的外乱の発生確率を比較すれば、一般的に磁気的外乱の発生確率の方が小さい。したがって先に提案したオープンループ方式の方が、より安定したアンテナ追尾制御が期待できる。

4. 走行追尾実験

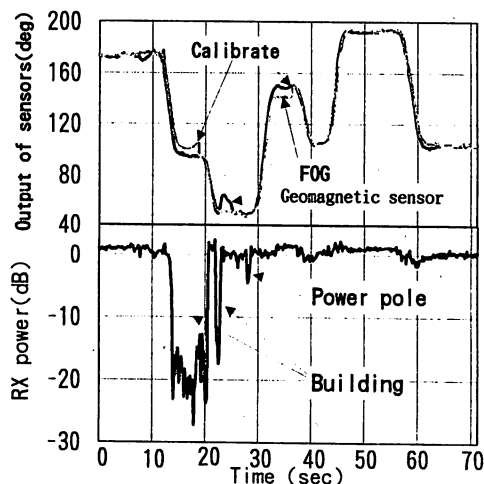
3章で述べたそれぞれのアンテナ追尾方式について、走行追尾実験を行った。実験方法は、アンテナシステム

を実験車に搭載し、異なった走行環境において実際に走行しながらアンテナ追尾を行うもので、このとき得られる衛星信号の受信電力レベルをパソコンで記録し、そのデータを基に追尾特性の評価を行った。衛星には技術試験衛星5型(ETS-V)を用い、衛星信号は一定電力のLバンド(1.5 MHz帯)の無変調波である。

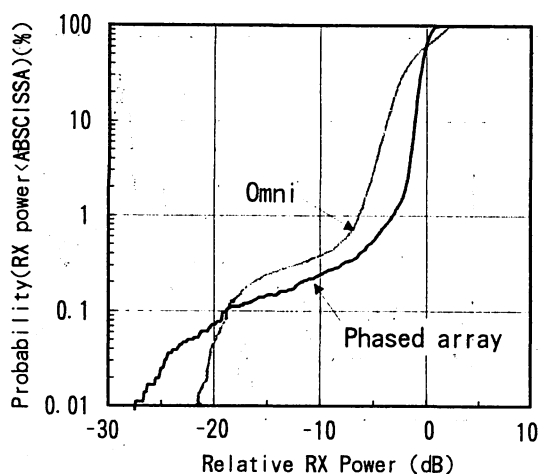
4.1 オープンループ方式

第8図は町中における追尾結果の一例である。図の上段に、FOGと磁気方位計が測定した角度データ、下段に、受信レベルを示す。図より、短時間内に右左折が頻繁に発生しており、また、受信レベルから、ビルや電柱などによるシャドウイングが発生していることが分かる。しかし、このような走行環境においても見通し時の受信レベルはほぼ一定になっており、さらにシャドウイング終了時は即座に受信レベルが見通し時と同じレベルまで回復していることから、追尾が良好に行われていることが分かる。また、図ではFOGの累積誤差の修正が数回行われていることが確認できる。FOGと磁気方位計の角度の測定結果を見ると、右左折時に誤差が多く発生している。これには主に二つの原因が考えられる。一つは、FOGが自動車の床面に取り付けられているため、右左折時に車体が傾いたとき、測定したい軸(鉛直軸)に対してFOGの測定軸が一致しなくなること、もう一つは、磁気方位計のセンサ部が車体の極近傍に設置されるため、車体が磁化していればその影響を受け測定値に誤差を含むことである。実際には、事前に車体の着磁の補正を行っているが、完全にその影響を除去することは困難である。

第9図は、一般の道路において走行追尾実験を行ったときのアンテナ追尾特性を、衛星信号の受信レベルの累



第8図 追尾結果の一例



第9図 追尾特性の一例

積確率分布で評価したものである。走行区間は、水戸市から鹿島町までの約 50 km で、走行時間は約 1 時間程度である。走行環境としては郊外型で、高い建造物が少ないことから比較的衛星方向の見通しが良く渋滞が少ない環境である。図の横軸は、見通し時の受信電力を 0 dB としたときの相対受信電力、縦軸は、受信電力が横軸を下回る確率である。追尾特性の評価は、走行区間内において、シャドウイング以外で受信レベルが低下した場合を追尾誤差によるものとし、その発生確率を求めた。このため、走行区間のシャドウイングの発生確率を得るために、衛星仰角方向の利得が約 4 dBi の水平面無指向性アンテナ (Omni) を用いて受信レベルを同時に取得した。受信レベルのサンプリングは、等時間サンプル (約 8 データ/sec) である。

無指向性アンテナの受信レベルの累積確率分布では、相対受信電力が -7 dB 付近で曲線が変化しており、それ以上では見通し状態、以下ではシャドウイングの影響を受けている状態と見ることができる。したがって、本走行区間のシャドウイングの割合は、全走行時間の 1 % 程度となる。一方、フェーズドアレイアンテナでは、-3 dB 付近で曲線が変化しており、それ以下をシャドウイングと見ると、その割合は無指向性アンテナとほぼ同じ 1 % 程度となっている。したがってシャドウイング以外では -3 dB 以上の受信レベルの減衰がほとんど発生していないことから、本アンテナシステムの追尾が長時間にわたり良好に行われていることが分かる。また、図より、それぞれのアンテナの見通し状態における受信レベルの変動の大きさを比較すると、フェーズドアレイアンテナのほうが小さくなっていることが分かる。これは、指向性アンテナが、ビーム方向以外からの反射波の影響

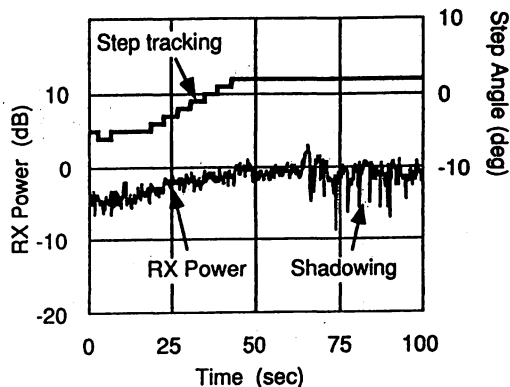
を受けにくいため、指向性アンテナを用いる利点の一つといえる。

4.2 併用方式

第 10 図は併用方式の追尾結果の一例である。本併用方式では、クローズドループにステップトラック方式を用いている。また、移動体に大きな方位角方向の変化あるいは衛星方向にシャドウイングが発生した場合は、FOG を方位測定センサとするオープンループに切り替わる追尾アルゴリズムになっている。図の RX Power は見通し時の受信レベルを 0 dB としたときの相対受信レベル、Step Angle は衛星方向を中心 (0°) としたときのステップトラックによってビームを走査した角度である。また、横軸は走行時間である。図より走行時間が 0 ~ 約 50 秒までの間にステップトラックによるビームの走査によって受信レベルが -4 dB から -1 dB 程度まで変化しており、衛星方向が推定される様子が分かる。また、60 秒付近からシャドウイングが発生しているが、この受信レベルの変化は追尾アルゴリズムでシャドウイングと判定されるため、追尾はオープンループに切り替わり、ビームの走査は行われていない。また、図から分かるようにビームの走査は非常にゆっくりと行われている。これは、本併用方式では、走行状態が急変した場合には即座にオープンループが対応するため、ビーム走査等のクローズドループの制御に厳しい時間的制限を受けないからである。このため、ビーム走査によって得られた受信レベルの変化が小さい時や受信レベルが変動して瞬時に衛星方向を判断することが出来ない場合でも、受信レベルの平均化等の処理を行って、なるべく正しい判断が行えるようになっている。

実際に走行追尾実験を行った過程から、クローズドループ方式における問題点を次に述べる。

- (1) 自動車が走行すると、受信周波数にドップラシフトが発生する。



第10図 ステップトラックによるアンテナ追尾

自動車の最高速度を 100 km/h とすると発生するドップラシフトは ± 100 Hz 程度である。したがって、衛星信号の受信装置にはドップラシフトを考慮した受信帯域幅を持たせるか、ドップラシフトに追従する機能が必要となる。

(2) 追尾用の衛星信号強度

追尾用の衛星信号は、ビームの走査あるいは追尾誤差によって受信レベルが低下した場合でも、受信帯域内に含まれるノイズ成分の影響によって受信レベルが変動しないよう、十分な S/N 比が得られる強度であることが望ましい。

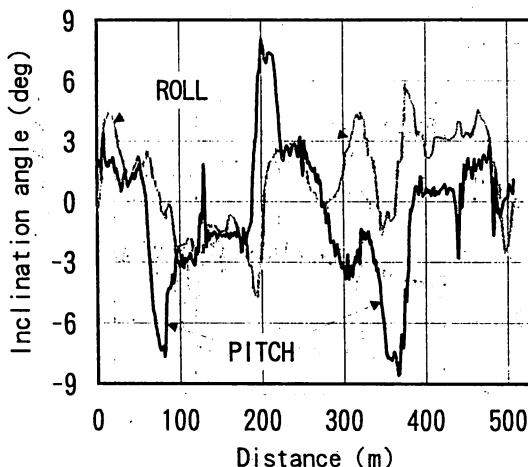
(3) アンテナ利得の変動

本システムの車載アンテナ（フェーズドアレイアンテナ）の利得は、素子配列の関係から方位角方向で ± 1.5 dB 程度の変化があり、受信レベルの補正が必要であった。これは、機械追尾方式の場合でも、車体からの反射等で同様の問題を生じる可能性がある。

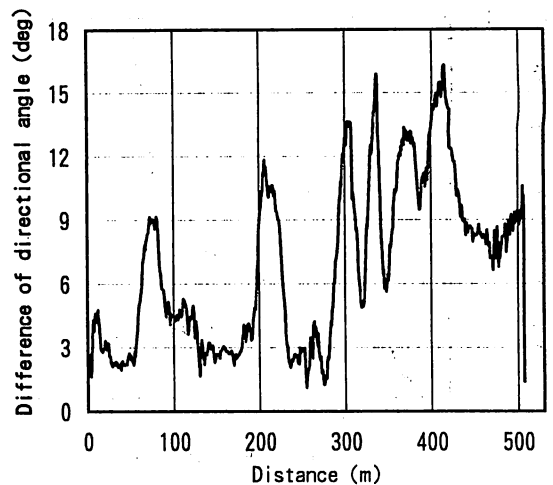
これらは、僅かな受信レベルの変化から衛星方向を推定するステップトラック等のクローズドループ方式では重要な問題である。

5. 走行時の自動車の挙動がアンテナ追尾に与える影響

本システムで用いた車載アンテナは、ビーム半値幅が $\pm 14^\circ$ 程度と広いことから、これまで述べてきたアンテナ追尾方式では方位角方向（ヨー軸）の変化を追尾の対象としてきた。しかし、実際には坂道やカーブでは、ピッチ（進行方向に対して上下）およびロール（横揺れ）に変化が発生し、それらは追尾誤差となるばかりでなく、FOG の累積誤差の発生の原因にもなっている。



第11図 走行時に発生する車体の挙動



第12図 衛星指向角度の差

ここでは、3軸光ファイバジャイロ（以下、3軸 FOG と略記する）を用いて、実験車のロール、ピッチおよびヨー軸回りに発生する回転運動を測定し、走行時の自動車の挙動がアンテナ追尾に与える影響について考察する。

第11図は、約 500 m の区間を走行したときの、車体のロールおよびピッチの挙動である。この走行区間には、一般道路で遭遇する程度の坂道やカーブが含まれている。図より、ロールには $\pm 6^\circ$ 程度、ピッチには $\pm 9^\circ$ 程度の角度の変動が発生していることが分かる。ただし、実験中の走行速度は約 15 km/h 程度と遅いことから、通常の走行時ではロールおよびピッチの変動はもう少し大きくなるものと思われる。したがって、このような状態では、FOG の測定軸は鉛直軸に対して傾くため、方位角方向に変化が発生した場合、FOG が測定する相対回転角には誤差が含まれ、それが累積されることになる。

第12図は、第11図で測定したデータを用いて、ヨー軸（方位角）だけで衛星方向を求めた場合と3軸全てのデータから衛星方向を求めた場合の衛星方向の角度差を示したものである。図では、第11図の 80 m および 210 m 地点などのピッチ角が大きく変動しているところで 10° 程度の角度差が発生していることが分かる。これは、ピッチ軸まわりの回転により車体が傾斜し、実験車のヨー軸が鉛直軸に対して傾いたことによって発生した誤差である。また、走行区間の後半ではヨー軸だけの制御の場合は累積誤差のために、前半に比べて角度差が大きくなっていることが分かる。この、ヨー軸だけの制御で発生する誤差のうち、累積誤差は最終的には磁気方位計により修正されるものであるが、車体の挙動によって発生する誤差は瞬時的に 3 dB 程度の受信レベルの低下を招く可能性を示唆している。しかし、これまで述べてきたよう

に、ここで提案したLバンドアンテナ追尾システムでは、車載アンテナのビーム半値幅が $\pm 14^\circ$ と広いことと累積誤差の修正過程があるためこのような追尾誤差が追尾精度（ビーム半値幅）を越えることは希であり、方位角方向のみの追尾で十分な追尾精度が得られる。

6. む す び

陸上移動体衛星通信に用いる車載用アンテナシステムの追尾系における、追尾方式、追尾アルゴリズムおよび走行追尾実験の結果について述べた。

陸上移動では、建物や樹木によるシャドウイング、機敏な移動体の動き、人工構造物による磁気的外乱など特有の問題を有することから、追尾方式および追尾アルゴリズムは陸上移動に適したものが必要である。

ここでは、これらの問題点と追尾方式を検討した結果から、比較的これらの問題の影響を受けにくいオープンループ方式を提案し、追尾アルゴリズムを含むアンテナシステムについて述べた。

本アンテナシステムを用いたオープンループ方式による走行追尾実験では、一般の走行環境において良好な追尾特性が得られることを確認した。

次に、3軸FOGを用いて測定した走行時の自動車の挙動について考察し、FOGの累積誤差の発生の原因が、車体の傾斜のためにFOGの測定軸が鉛直軸にたいして傾くことであることを示した。また、この車体の傾斜によるアンテナ指向誤差は、一般の走行環境においても 10° 程度になる。しかし、FOGの累積誤差についてはここで提案した修正過程を用いることにより、総合的な追尾誤差が本アンテナシステムの目標とした追尾精度（ 14° ）を越えることは希であり、方位角方向のみのアンテナ追尾でも十分な追尾精度が得られることを確認した。

本論文で述べたオープンループ方式のアンテナ追尾において発生する追尾誤差は、FOGの累積誤差、磁気方位計の測定誤差に分けることができる。このうち、磁気方位計の測定誤差は磁気的外乱によって地磁気そのものが乱される場合を除き、車体の着磁等の補正を十分に行うことでかなり軽減することが可能である。また、FOGの累積誤差については本論文で述べた累積誤差の修正が頻繁に行える走行環境であれば、磁気方位計の測定精度に近づけることができる。しかし、車体の傾斜による指向誤差は方位角方向のみのアンテナ追尾では、一般の走行環境でも 10° 程度となる。したがって、本オープンループ方式では、ビーム幅がこの指向誤差を許容できることが必要となる。ただし、陸上移動体衛星通信ではユーザーの大半が、小型乗用車等のパーソナルなものになる

と予想されることから、Lバンドでは搭載できるアンテナの大きさや形状を考慮すると本論文で述べたフェーズドアレイアンテナ程度の大きさが限界と思われる。したがって、ビーム半値幅は 10° 以上になると考えられ、本オープンループ方式が実用的な追尾方式として有効であるといえる。

今後は、Kaバンド／ミリ波帯における移動体衛星通信で用いる車載用アンテナシステムの研究を行う⁽¹²⁾。ここでは、本論で述べたような方位角方向のみの追尾ばかりでなく、ロール軸、ピッチ軸まわりの車体の動揺を補償するアンテナ追尾システムが必要になる。

謝 辞

アンテナ追尾システムの開発を行うに当たり有益な助言をいただいた日立電線(株)光ジャイロ開発課の関係各位に感謝いたします。また、走行実験において御協力いただいた宇宙通信技術研究室各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) Wagg M.: MOBILESAT, Australia's Own", Proc. the 2nd International Mobile Satellite Conference, pp.3-7, Ottawa Canada (June 1990).
- (2) Wachira M.: "Domestic Mobile Satellite Systems in North America", Proc. the 2nd International Mobile Satellite Conference, pp. 19-27, Ottawa Canada (June 1990).
- (3) Garner W.B.: "The American Mobile Satellite System", Proc. the 2nd International Mobile Satellite Conference, pp.28-31, Ottawa Canada (June 1990).
- (4) Woo K., Huang J., Jamnejad V., Bell D., Berner J., Estabrook P. and Densmore A.: "Performance of a Family of Omni and Steered Antennas for Mobile Satellite Applications", Proc. the 2nd International Mobile Satellite Conference, pp.540-546, Ottawa Canada (June 1990).
- (5) Hung J. and Densmore A.: "Microstrip Yagi Array for MSAT Vehicle Antenna Application", Proc. the 2nd International Mobile Satellite Conference, pp.554-559, Ottawa Canada (June 1990).
- (6) 平子智明, 佐藤和夫, 山田直之, 渡辺俊明, 西川訓利, 三河俊正: "車載衛星通信用アンテナ追尾システム", 1991年信学秋季全大, B-116.

- (7) 伊藤泰宏, 王丸謙治, 山崎滋: “車載用衛星放送受信システム”, NHK 技研 R&D, No.8(1990-02).
- (8) 大森慎吾, 田中健二, 山本伸一, 松永誠, 土屋牧夫: “衛星通信用車載型フェーズドアレイアンテナ”, 信学技報, AP90-75, SANE90-41(1990-10).
- (9) 真野和彦, 井家上哲史, 門脇直人, 田中健二, 大森慎吾: “車載アンテナ用追尾システムの検討”, 1990 信学秋季全大, B-158.
- (10) 山本伸一, 田中健二, 小原徳昭, 若菜弘充, 大森慎吾: “陸上移動衛星通信実験—車載用アンテナシステムの開発と高速道電測実験結果—”, 信学技報, SAT 92-8, (1992-05).
- (11) 梶岡博, 熊谷達也, 於保茂: “干渉型光ファイバジャイロ”, オプトロニクス, No.5 (1990).
- (12) 山本伸一, 田中健二, 若菜弘充, 梶岡博, 飯塚寿夫, 宮崎淳平: “車載用高精度アンテナ追尾システムの検討”, 信学春季全大, B-215(1992).