鉄道車両に搭載された衛星追尾アンテナのプログラム追尾の 実現性に関する検討^{*1}

A Feasibility Study on the Program Tracking of the Satellite Tracking Antenna Mounted on Train

石川 博 規^{*2}・三 次 仁^{*2}・永 瀬 文 昭^{*2}・上 羽 正 純^{*2}・渡 辺 光 庸^{*2}
Hironori ISHIKAWA, Jin MITSUGI, Fumiaki NAGASE, Masazumi UEBA and Mitsunobu WATANABE

Key Words: Satellite Communication, Satellite Tracking Antenna, Program Tracking

Abstract: We have proposed mobile multimedia satellite communication system designed to realize high-speed multimedia communications. This system uses a mobile network for the return link and the developed satellite-tracking antenna that receives high-speed satellite signals for the forward link. The satellite-tracking antenna, which consists of four planar antennas, measures the pointing error by the phase monopulse and has achieved the satellite-tracking control by the co-phasing combining and the mechanical drive. When the satellite-tracking antenna is applied to the car and the ship, it is necessary to decide the tracking drive angle constantly. When it is applied to the train, the satellite-tracking can be expected to be achieved by specifying the tracking drive angle in accordance with the distance because the train runs in the same route. This tracking method is called a program tracking in this paper. This paper describes the tracking drive angle and the error factor of the program tracking quantitatively. We concluded that it was possible to apply the program tracking to the train if operating rate of the system was 70% or less.

1. は じ め に

近年, ADSL, 無線アクセスなどブロードバンドインターネットの利用が急激に増加している. 今後は移動中においてもマルチメディアコンテンツにアクセスしたいという要望が高まり, 低コストで高速通信が可能なサービスが必要になってくる. この要求を満たすために, 自動車をはじめとした様々な移動体において高速インターネットアクセスを提供するための研究開発が活発に行われている¹⁻³⁾.

インターネットにおける回線速度は, サーバからクライアントへの下り回線は高速であることを必要とするが, クライアントからサーバへの上り回線は低速でもよいという特徴がある⁴⁾. そこで, 著者らは移動中でも高速なマルチメディア通信を実現するために, 移動体からの上り回線として携帯電話に代表される地上移動通信網を利用し, 下り回線として衛星追尾アンテナを使用した高速な衛星回線を利用するモバイルマルチメディア衛星通信システムを提案, 構築してきた⁵⁻⁷⁾. 本システムのサービスイメージを第 1 図に示す. 移動体からの要求信号などは移動通信網によりサーバへ送信される. サーバから提供される動画などの大容量マルチメディアコンテンツは衛星回線を経由して最大約 30 Mbit/s の伝送速度で各移動体へ配信される. モバイ

ルマルチメディア衛星通信システムの有効性を実証するために, 現在までに衛星追尾アンテナを自動車⁸⁾, 鉄道車両⁹⁾および船舶に搭載した場合の実験的評価を行い, 移動中でもポインティング損失が 1 dB 以下の追尾精度を確保できることを確認している.

衛星追尾アンテナを自動車や船舶, 航空機に適用する場合には, 移動のたびに衛星追尾角度を決める要因(例えば道程や航程, 道路状況や海面状況)が異なるため, あらかじめ衛星追尾角度を指定することはできないが, 鉄道車両の場合には一旦路線が決まってしまう衛星追尾角度を線路上の位置に応じて指定することで衛星追尾が実現できることが期待できる. 本稿ではこれをプログラム追尾と呼ぶことにする. プログラム追尾が可能になれば, 衛星追尾アンテナの駆動角度範囲や追尾角速度といった要求性能の低減やそれによる製造費の削減, またトンネルなどの遮蔽により衛星追尾が不可能な区間を通過後の衛星捕捉時間が短縮され, 稼働率(全走行区間に対して衛星信号を受信できる区間の割合)の向上などの利点がある.

プログラム追尾はこれまでも言及されている¹⁰⁾が, 実現性について定量的に検討した例は報告されていない. そこで本稿ではプログラム追尾の実現方法および, それを適用する場合に追尾精度決定のために必須である衛星追尾角度の誤差評価方法を提案するとともに, 実際の鉄道車両走行データから衛星追尾角度誤差を定量的に評価し, プログラム追尾の実現性を定量的に検討した結果を報告する.

^{*1} © 2004 日本航空宇宙学会

平成 15 年 8 月 7 日原稿受理

^{*2} 日本電信電話(株)NTT 未来ねっと研究所

第1図 サービスイメージ

2. プログラム追尾

鉄道車両のように走行経路が一定である移動体において、走行中にステップトラックやモノパルス等で衛星を追尾するのではなく、事前に取得した移動体の位置と衛星追尾角度の関係に基づき、オープンループで衛星を追尾する方法をプログラム追尾と本稿では定義する。本章ではまずプログラム追尾の実現方法を定め、このプログラム追尾を鉄道車両に適用する場合に問題となる衛星追尾角度誤差の評価方法を示す。

2.1 プログラム追尾の実現方法 プログラム追尾を実現するためには、ある位置を起点にした軌道上の距離(キロ程)に応じた衛星追尾角度を求めることが必要である。キロ程は一般的に鉄道の運行システムにおいては車軸の回転を測定することによって取得されている。このキロ程データに基づき、衛星追尾アンテナに対して方位角、仰角方向の衛星追尾角度指示値を制御器から送出することでオープンループ制御が可能である。衛星追尾角度指示値はキロ程に応じた緯度、経度、高度情報を地図データ等から読み取り、衛星の追尾方向を決める方法も考えられるが、この手法では鉄道軌道に必ず存在する線路の傾きを考慮することができず、衛星追尾角度誤差を生じる原因となる。ジャイロ等により傾きデータを別途取得しこの軌道の傾きを補正することも可能だが、指示値データの準備手順が複雑になると予想される。著者らが開発した衛星追尾アンテナ⁸⁾では、位相モノパルス制御により方位角方向、仰角方向の駆動角度を求めることができるため、一旦このアンテナを搭載して走行することで、キロ程に対応した衛星追尾角度指示値を取得し、実際の運用では位相モノパルス制御機能を有しない(つまり低コストの)衛星追尾アンテナを取得した衛星追尾角度指示値によってオープンループ制御することが現実的である。以下の検討ではこのようにして衛星追尾角度指示値を取得することを想定する。

2.2 プログラム追尾時の衛星追尾角度誤差評価法 プログラム追尾を適用する場合に衛星追尾角度精度を決定する誤差要因を抽出し、各要因に対する誤差量を評価する手法を提案する。

2.2.1 プログラム追尾時の衛星追尾角度の誤差要因 衛星追尾角度精度を決定する誤差要因として以下の3つを考

えた。

- (1) キロ程の誤差: キロ程は多くの場合、車軸の回転数により求められるため車輪がレールに対してすべることにより誤差が生じる。衛星追尾角度指示値はキロ程に対して設定されているため誤差が生じる。ただし鉄道によってはキロ程の校正を定期的に行っている場合もある。
- (2) 車両傾き角度(ヨー軸回転, ロール軸回転, ピッチ軸回転)の再現性: 計画速度で同一の路線を走行した際でも、速度誤差や運転手の技量によって車体の傾き角度は走行ごとに変化する。これにより衛星追尾角度に誤差が生じる。
- (3) 衛星追尾アンテナの振動: 衛星追尾アンテナは鉄道車両の屋根上にボルト等で固定されることになる。衛星追尾アンテナの車両への取り付け面と電波を受信するアンテナ面間の角度を衛星追尾角度指示値をもとに制御するわけだが、機械追尾を含む場合には機構を有するため取り付け面とアンテナ面間での振動や熱変形によるアライメント誤差が発生し、それにより誤差が生じ、衛星追尾角度指示値どおりに動かしたとしても誤差が生じる。

以下では上記の誤差要因をそれぞれ定量化する方法について述べる。

2.2.2 キロ程による誤差 キロ程による誤差(Di : i は回転方向(ヨー軸回転, ロール軸回転, ピッチ軸回転)を示す)を定量化するために同一区間の路線を複数回走行し、キロ程を積算することにより駅間距離を求める。実際にデータを整理すると駅間距離は走行ごとに若干異なっており、これをキロ程の誤差と考えた。車両傾き角度とキロ程の関係において、車両傾き角度を維持したままキロ程を誤差分増加させた場合の軌跡を導く。そして2つの車両傾き角度を比較することで、キロ程による誤差を算出した。

2.2.3 車両傾き角度の再現性による誤差 車両傾き角度の再現性による誤差(Ri)を定量化するために、同一の路線を複数回走行し、キロ程に対する車両傾き角度を走行ごとに求める。上述したキロ程の誤差の影響を取り除くために、駅ごとにキロ程を補正し、車両傾き角度を比較することで車両傾き角度の再現性による誤差を算出した。

2.2.4 衛星追尾アンテナの振動による誤差 衛星追尾アンテナの振動による誤差(Vi)を定量化するために、以下の座標系を導入する。座標系は全て右手系で定義し、添え字1, 2, 3で直交3軸を表す。

- (1) 地表面系 e : 走行地点における北方向に e_{-3} 軸が、西方向に e_{-1} 軸、鉛直方向に e_{-2} 軸と定義する。
- (2) 鉄道車両初期系 r_0 : 地表面座標系を e_{-2} 軸周りに回転させ起点における鉄道車両の進行方向を r_{0-1} となるように定めた座標系。この時点では鉄道車両の屋根や底面は水平面上にあると仮定しており、起点における角度誤差はあとで導入する。
- (3) 鉄道車両走行系 r : 鉄道車両初期系を r_{0-2} 軸周りに ψ だけ回転してヨー軸回転、続いて r_{0-3} 軸周りに θ だけピッチ軸回転、 r_{0-1} 軸周りに ϕ だけロール軸回転させた座標系。実績により θ と ϕ は線形化可能な程度に小さ

いと考える．

- (4) 衛星追尾アンテナベースプレート系 a_o : r 座標系を回転させて衛星追尾アンテナのベースプレートに固定する系．これは屋根上に取り付ける際のヨー軸，ロール軸，ピッチ軸の取り付け誤差および後述する追尾アンテナ系のアジマス = 0 方向によって決定される．
- (5) 追尾アンテナ系 a : 追尾アンテナのアンテナ面に固定された座標系であり，衛星方向が a_3 ，仰角制御が a_1 軸周り，方位角制御が a_2 軸周りとなるように決定した座標系．

上記で定義した座標系間の関係は回転変換行列を用いて次のように表すことができる．ここで e, r_o 等は直交 3 軸の単位ベクトルの方向を文献 11) に述べられる手法で記述したものである．

$$r_o = eR_{y_o} \quad (1)$$

$$r = r_oR_yR_pR_r \quad (2)$$

$$a_o = rR_{rao} \quad (3)$$

$$a = a_o\Psi_a\Phi_a \quad (4)$$

さて，(1) の R_{y_o} は鉄道車両起点での鉄道車輛方向がわかれば求めることができる．(2) における R_y, R_p, R_r は鉄道に加速度計，ジャイロ計を搭載することで求めることができる．(3) における R_{rao} はキロ程起点における緯度，経度，高度が取得できれば，求めることができる．つまり起点における追尾アンテナ系 a と地表面系 e の関係は起点の緯度，経度，高度情報と衛星の軌道上位置を用いて次の形で求めることが可能である．

$$a = eR_{ea} \quad (5)$$

キロ程起点における鉄道の傾き情報と衛星追尾アンテナの駆動角度情報を用い，式 (1)～(4) と (5) を等値することで R_{rao} は次の形で求めることができる．

$$R_{rao} = R_r^T R_p^T R_y^T R_{y_o}^T R_{ea} \Psi_a^T \Phi_a^T \quad (6)$$

これらの関係を用いれば，走行状態において測定した $R_r, R_p, R_y, \Psi_a, \Phi_a$ ，(5) で求めた R_{ea} と (6) で求めた R_{rao} を用いることで，走行中の追尾アンテナと取り付けプレート間の振動による誤差回転行列 E は以下を満足することがわかる．

$$R_{y_o}R_yR_pR_rR_{rao}\Psi_a\Phi_aE = R_{ea} \quad (7)$$

ここで， E はヨー軸回転，ロール軸回転，ピッチ軸回転の誤差成分を微小回転角度 ψ_e, ϕ_e, θ_e として

$$E = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_e & \psi_e \\ \theta_e & 1 & -\phi_e \\ -\psi_e & \phi_e & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる．

このように鉄道車両を走行させヨー軸回転，ロール軸回転，ピッチ軸回転を測定し，衛星追尾アンテナで方位角，仰角を測定しておけば E マトリクスを定量化することができる．

2.2.5 衛星追尾角度誤差 2.2.2～2.2.4 章で算出した誤差（キロ程による誤差 Di ，車両傾き角度の再現性による誤差 Ri ，衛星追尾アンテナの振動による誤差 Vi ）は，性質上独立しているためプログラム追尾による誤差の総和 Si は次式により算出することができる．

$$Si = \sqrt{Di^2 + Ri^2 + Vi^2} \quad (9)$$

3. 適用例

代表的な鉄道路線において鉄道車両を走行させた実験を行い，衛星追尾角度誤差評価を定量的に評価した．まず，鉄道車両に衛星追尾アンテナを搭載して，マルチメディア衛星システムに適用するための要求条件を示す．次に実際の衛星追尾角度誤差を提案した評価式から算出する．そして鉄道車両に対するプログラム追尾の実現性を検証する．

3.1 要求追尾精度 モバイルマルチメディア衛星通信システムでは，回線設計上許容されるポインティング損失を 1 dB としており⁸⁾，これに対して許容される指向方向誤差を実測により求めた．本追尾アンテナと衛星が正対している状態から方位角方向，および仰角方向にアンテナを動かす，そのときに受信した衛星ビーコン波の受信レベルの変化を測定した．方位角指向特性を第 2 図，仰角指向特性を第 3 図に示す．第 2 図，第 3 図から要求衛星追尾角度誤差は方位角で $-1.8 \sim +2.4^\circ$ となり，小さいほうを要求精度として 1.8 度 PP (Peak to Peak)，仰角も同様に $-3 \sim +2^\circ$ であるので，要求精度は 2 度 PP である．簡単のために仰

第 2 図 追尾アンテナの方位角指向特性

第 3 図 追尾アンテナの仰角指向特性

角, 方位角ともに 1.8 度 PP を要求精度と考える.

3.2 衛星追尾角度の誤差評価

3.2.1 キロ程による誤差 キロ程の誤差を定量化するために, 同一区間の路線を往復し, それぞれの速度から算出したキロ程を比較した. その結果, キロ程の算出誤差平均は約 2% であることがわかった. キロ程に約 2% の誤差を持つ場合の車両傾き角度変化を検討した. まず実測した車両傾き角度とキロ程の関係において, 車両傾き角度を維持したままキロ程を 2% 増加させた場合の軌跡を導く. 次に 2 つの軌跡の車両傾き角度の差を算出し, キロ程による誤差とした (第 4 図). キロ程による誤差の平均, および標準偏差 (σ) を第 1 表に示す. ヨー軸回転およびロール軸回転の誤差は 3.1 章で示した要求精度 1.8 度 PP を超えていることがわかる. そこで, キロ程を定期的に補正した場合の車両傾き角度の誤差量を第 2 表に示す. 第 2 表を参照すると, ロール軸回転, ピッチ軸回転の平均値以外は, キロ程補正区間が減少すると誤差量が減少していることがわかる. ロール軸回転, ピッチ軸回転の平均値において, 有効桁数を 10^{-2} に設定したため, 0.01 の違いが生じているが, 実際の誤差量は最大 0.003 と非常に小さい. また, 各軸回転の誤差量は誤差の平均に誤差の標準偏差 (σ) を加えた値であり, 各軸回転の誤差量はキロ程補正区間が減少することにより減少している. よって, 定期的にキロ程の補正を行うことで, キロ程による誤差を大幅に小さくすることが可能である.

3.2.2 車両傾き角度の再現性による誤差 再現性による誤差を定量化するために, 走行日の異なる試験結果において, 車両傾き角度を比較した. 上述したように算出したキ

第 4 図 キロ程による誤差

第 1 表 キロ程による誤差量

	平均 (°)	標準偏差 (°)
ヨー軸回転	-0.60	19.22
ロール軸回転	0.06	3.26
ピッチ軸回転	0.01	0.51

第 2 表 キロ程補正による誤差量の変化

キロ程補正 区間 (km)	ヨー軸回転		ロール軸回転		ピッチ軸回転	
	平均 (°)	標準偏差 (°)	平均 (°)	標準偏差 (°)	平均 (°)	標準偏差 (°)
0.5	0.00	0.69	0.01	0.31	0.02	0.13
1	0.00	1.37	0.00	0.56	0.02	0.14
2	0.00	2.70	0.00	1.01	0.01	0.17
3	0.01	4.00	0.00	1.41	0.01	0.21

ロ程は約 2% の誤差を持つことから, 2.2.3 章に述べた手法によってキロ程誤差を補正した. その後, 車両傾き角度を比較し, 再現性による誤差を算出した (第 5 図). 第 5 図において, case 1, case 2 は走行日の異なる同路線の試験結果であり, case 2 はキロ程データを駅ごとで補正することにより車両が傾く位置を case 1 と一致させている.

3.2.3 衛星追尾アンテナの振動による誤差 2.2.4 章に述べた方法を用いてロール軸周りの衛星追尾アンテナの振動による誤差を第 6 図に示す. キロ程が 1 km から 2 km の間で大きな誤差が出ているが, これは遮蔽物によって衛星追尾アンテナから衛星が見えなくなり, 正確な方位角, 仰角が与えられなかったことが原因である. この区間を除き衛星追尾アンテナの振動による誤差を算出した. それぞれの誤差の平均, および標準偏差 (σ) を第 3 表に示す. ピッチ軸回転に比べてロール軸回転, ヨー軸回転の誤差が小さいのは, 振動誤差は 3 軸で生じるにもかかわらず実際の制御

第 5 図 車両傾き角度の再現性による誤差

第 6 図 衛星追尾アンテナの振動による誤差

第 3 表 衛星追尾アンテナの振動による誤差量

	平均 (°)	標準偏差 (°)
ヨー軸回転	0.01	0.22
ロール軸回転	-0.01	0.55
ピッチ軸回転	0.66	1.09

第4表 プログラム追尾による衛星追尾角度誤差

誤差要因	ヨー軸回転		ロール軸回転		ピッチ軸回転	
	平均 (°)	標準偏差 (°)	平均 (°)	標準偏差 (°)	平均 (°)	標準偏差 (°)
キ口程						
補正 (0.5 km)	0.00	0.69	0.01	0.31	0.02	0.13
補正 (1 km)	0.00	1.37	0.00	0.56	0.02	0.14
補正 (2 km)	0.00	2.70	0.00	1.01	0.01	0.17
補正 (3 km)	0.01	4.00	0.00	1.41	0.01	0.21
再現性	0.00	1.89	-0.03	0.71	0.04	0.38
振動	0.01	0.22	-0.01	0.55	-0.01	0.55

第7図 稼働率と受信レベルの劣化量の関係

軸が方位角と仰角の2軸であることが原因である。今回の座標定義では仰角制御はロール軸回転に一致し、振動誤差を衛星追尾で補っているため、ロール軸回転誤差は小さくなっていると考えられる。

3.3 プログラム追尾の実現性 プログラム追尾の誤差要因をまとめて記述すると第4表になる。3.2.3章で算出したピッチ軸回転は制御軸による補正を行っていないため、正確な値ではない。そこで、第4表において衛星アンテナの振動による誤差のピッチ軸回転はロール軸回転と同一の値を使用した。第4表を参照すると、衛星追尾角度誤差は、キ口程補正区間を0.5 kmにした場合(9)式からヨー軸回転で2.0°、ロール軸回転で1.0°、ピッチ軸回転で0.7°となる。ここで、(9)式に代入した各誤差は誤差の平均に誤差の標準偏差(σ)を加えた値である。次に、各誤差の度数分布はほぼ正規分布と見なせることから、各誤差の標準偏差(σ)を1~3 σ まで変化させ、稼働率と受信レベルの劣化量の関係を明らかにした結果を第7図に示す。第7図を参照すると、方位角に関しては稼働率70%以下、仰角に関しては稼働率95%以下であれば、要求条件である利得劣化1 dB未滿を満たすことができる。

以上のことから、要求条件において、衛星追尾角度誤差のマージンが大きい、あるいは高稼働率を必要としないシステムにプログラム追尾を使用することは有効であると考えられる。追尾誤差マージンを大きくすることができないシステムや稼働率を95%より大きくする必要があるシステムはプログラム追尾のみでは困難であり、衛星追尾角度を走行ごとに決定するシステムが必要である。

4. 結 論

著者らは、モバイルマルチメディア衛星通信システムの

鉄道車両への適用において、衛星追尾角度を線路上の位置に応じて指定することで衛星追尾が実現できること(プログラム追尾)に着目した。そして、プログラム追尾の実現方法、衛星追尾角度の誤差評価方法を提案し、プログラム追尾の実現性を実際の鉄道車両走行データから定量的に検討した。キ口程の誤差、車両傾き角度の再現性、衛星追尾アンテナの振動による誤差から算出した衛星追尾角度誤差を評価することにより、方位角に関しては稼働率70%以下、仰角に関しては稼働率95%以下であれば、モバイルマルチメディア衛星通信システムの要求条件である利得劣化1 dB未滿を満たすことができることを明確にした。

今後、高精度なジャイロを使用することや、GPS信号を使用してヨー軸回転に補正を行うこと、衛星追尾アンテナのベースプレートとアンテナ面の剛性を高くすることで方位角の誤差を低減することが期待できる。

参 考 文 献

- de la Chapella, M., Parkman, D. S., Martens, P. J., Mclain, C. J. and Jenkins, J. C.: Connection by Boeing—Broadband Satellite Services for Aircraft, AIAA-Paper-2001-98, ICSSC, 2001.
- Johnson, G. W., Kawamoto, R. and Bauer, D.: An Intelligent Router for Improved Network Performance over Mobile Satellite Links, AIAA-Paper-2001-43, ICSSC, 2001.
- Nishimura, T., Mori, T., Ishii, J., Mori, T., Miyatsu, K., Matsuzawa, K. and Tomita, T.: Bluetooth Launch Trial in Hikari Rail Star, IEE-Japan Tech. Meeting on Transportation & Electric Railway, TER-02-67, 2002, pp. 11–14.
- Nakayama, M., Araki, K., Kobayashi, M. and Nakashima, H.: A Satellite Communication System Using ATM Multiplex Scheme for Interactive Multimedia Networks, 48th IAF, 1997.
- 田中 博, 風間宏志, 中山正芳, 関 智宏, 永瀬文昭, 水野秀樹: 高速移動体対応マルチメディア衛星通信システム, 信学技法, SANE99-126, SAT99-163 (2000-02), 2000, pp. 141–146.
- 永瀬文昭, 田中 博, 上羽正純: Kuバンド衛星回線を用いた移動体でのIPネットワーク性能, 信学技法, SAT2001-55 (2001-10), 2001, pp. 77–82.
- Nagase, F., Tanaka, H., Nakayama, M., Seki, T., Kazama, H. and Mizuno, H.: Mobile Multimedia Satellite Communication System at Ku Band, IEICE Trans. Commun., E84-B, 2001.
- Nagase, F., Tanaka, H., Mitsugi, J. and Ueba, M.: IP Network Performance of a Ku Band Mobile Multimedia Satellite System, 20th AIAA ICSSC, 2002.
- 石川博規, 三次 仁, 目黒 在, 永瀬文昭: 鉄道車両に搭載された衛星追尾アンテナの追尾精度に関する研究, 第46回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2002, pp. 1150–1155.
- 関 清隆, 佐々木伸, 山村 博: 列車における衛星放送受信の検討, sat-87-1, 1987.
- Kane, T. R., Linkins, P. W. and Levinson, D. A.: Spacecraft Dynamics, McGraw-Hill, 1983.