

TR-O-0109

29

非静止衛星通信ネットワークにおける  
光衛星間通信パラメータの評価

木村 和宏

1996. 3. 6

ATR光電波通信研究所

非静止衛星通信ネットワークにおける  
光衛星間通信パラメータの評価

(株) A T R 光電波通信研究所

無線通信第一研究室

木村和宏

# 目次

1. まえがき	1
2. 衛星配置と軌道パラメータ	1
2.1. 1機の衛星のカバレッジ範囲	1
2.2. 衛星軌道パラメータ	3
2.3. 衛星間通信の可視範囲	6
3. 光衛星間通信の特性パラメータ	7
4. パラメータ評価結果	10
4.1. 同一軌道面内の衛星間通信	10
4.2. 同期して運動する衛星間の通信	11
4.3. 互いに逆方向に運動してすれ違う衛星間の通信	24
5. むすび	38
謝辞	38
参考文献	39
付録：光衛星間通信パラメータ評価プログラム	40
プログラムソースリスト	43

## 1. まえがき

低高度地球周回軌道 (LEO) または中高度地球周回軌道 (MEO) に多数の衛星を配置し、グローバルな衛星通信サービスを提供するシステムが、最近数多く提案されている。そのうちのいくつかのシステムについては、近い将来衛星の打ち上げが行なわれ、実運用される予定になっている [1-5]。

初期のシステムでは衛星間通信を利用しないものが多い。Kaバンドの電波を用いて衛星間通信を行なって、ネットワークを構成するものもあるが、伝送容量はあまり大きくない。次世代のシステムであるテレデシック [5] では、60GHz帯のミリ波を使って1Gbps以上の衛星間データ伝送を行なう。しかしながら、これ以上の大容量の通信を周囲の複数の衛星と行なう場合には、搬送波として光を用いる光衛星間通信を利用するのが適当であると考えられる。光衛星間通信を用いると、電波を使用した場合と比較して、小型のアンテナおよび端末でさらに大容量のデータ伝送が可能になる。また、周波数の割り当てを受ける必要もなく、他の通信リンクとの干渉もほとんどないという利点がある。しかしながら、光衛星間通信では使用する光ビームの幅が非常に狭くなるために、 $1 \mu \text{ rad}$  以下という非常に高い精度で相手衛星から届く光を追尾し、正確に相手に向けて送信光ビームを指向する必要がある。また、現在の技術では送信器の光出力が十分ではなく、大出力のレーザーや光増幅器を開発する必要がある。また、衛星間距離の変化による受信レベルの変動に対応できるダイナミックレンジをもつ光受信器も開発しなければならない。

これらの開発を行なう際には、それぞれの機器にどの程度の性能が要求されるのかを事前に評価しておく必要がある。そこで、LEO および MEO の軌道高度について、同一軌道面内、同期して衛星が運動している軌道間、互いに逆方向にすれ違う軌道間の3種類の光衛星間通信に関するパラメータの評価を行なった。

## 2. 衛星配置と軌道パラメータ

### 2.1. 1機の衛星のカバレッジ範囲

地球周回軌道上に1機の衛星を配置した場合、その衛星によるカバレッジ範囲は、図1から明らかのように衛星の軌道高度  $h$  と地上から見た最小仰角  $\theta$  に依存する。地球の半径を  $R$  とすると、1機の衛星によるカバレッジ円の地心半径  $\phi$  は、

$$\phi = \cos^{-1} \left( \frac{R \cos \theta}{R + h} \right) - \theta \quad (1)$$

で表される。LEO と MEO の5種類の軌道高度について、地上から見た最小仰角とカバレッジ半径の関係を図2に示す。

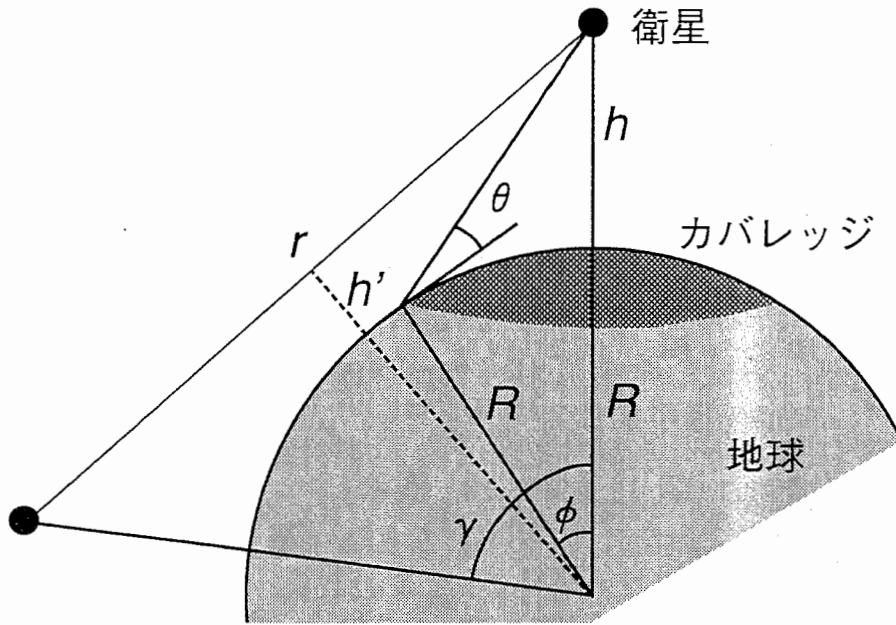


図 1: 1機の衛星によるカバレッジおよび衛星間通信路の最低高度

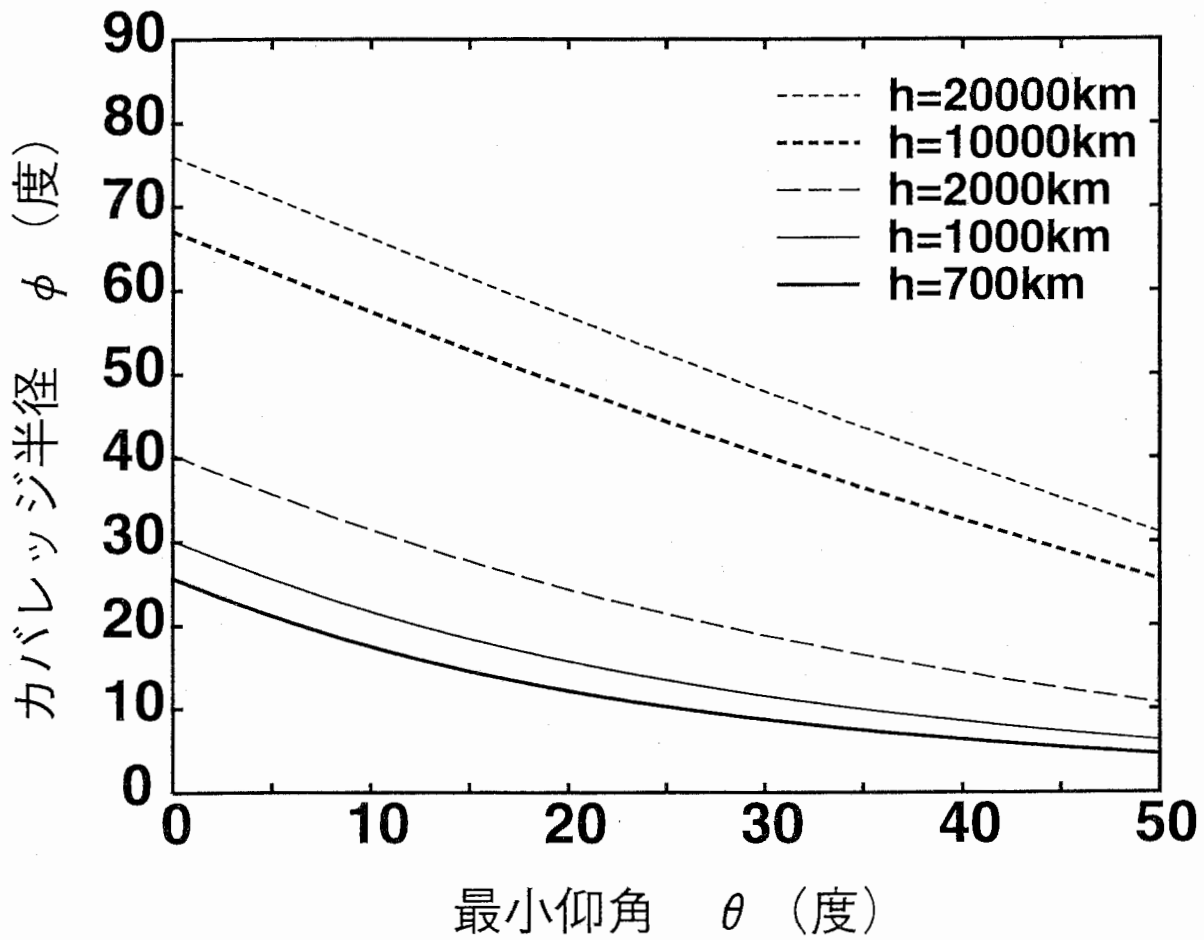


図 2: 地上から見た最小仰角とカバレッジ半径の関係

## 2.2. 衛星軌道パラメータ

ここでは、全ての衛星を同一の軌道高度に配置する場合のみを考え、静止衛星で中継を行なう [6]、2層構成にして機能を分担する [7,8] というような、異なった高度にある衛星間の通信については対象外とする。両方の衛星が同一高度にある場合に限定すると、全ての衛星間通信は、同一軌道面内にある2衛星間の通信、同一方向に同期しながら運動する別々の軌道面内にある2衛星間の通信、互いに逆方向に運動しながらすれ違う2衛星間の通信のいずれかに分類される。

LEO または MEO を用いた衛星通信ネットワークでは、構成する各衛星のカバレッジを2次的に並べ、必要数以上の衛星によるカバレッジが任意の地点で常時得られるように衛星を配置する。一般的には、軌道間隔  $\Delta\Omega$  を等しくとった  $p$  本の軌道面上に、それぞれ  $s$  個の衛星を等間隔に並べるような配置がとられる。極軌道と傾斜軌道の場合の衛星配置の一例を図3に示す。この図には隣接した2つの軌道面内で同期して運動する衛星の配置と、関連する軌道パラメータを示している。このような配置は、1衛星以上による連続カバレッジを実現するための最も一般的なものである。この他にもいろいろな配置方法が考えられるが、光衛星間通信の特性に影響を与えるのは、軌道面内の衛星間隔  $\delta$  と軌道間隔  $\alpha$  または  $\alpha'$ 、および関与する衛星の公転位相差  $\beta$  である。したがって、どのような衛星配置をとるかに関わらず、また相手衛星が隣接位置にあるかどうかに関わらず、これらのパラメータが同じであれば衛星間通信の特性も同じである。

同一軌道面内での衛星間通信に関与するパラメータは、衛星高度  $h$  および衛星間隔  $\delta$  で、 $\delta$  は次式で与えられる。

$$\delta = 2\pi/s \quad (2)$$

これは使用する軌道が極軌道であるか傾斜軌道であるかには依存しない。

同一方向に同期しながら運動する別々の軌道面内にある2機の衛星間の通信特性に関与するパラメータは、 $h$  と軌道間隔  $\alpha$ 、および公転位相差  $\beta$  である。図3から明らかなように、極軌道の場合は

$$\alpha = \Delta\Omega \quad (3)$$

$$\beta = \Delta M \quad (4)$$

である。但し  $\Delta\Omega$  は2つの軌道面の昇交点経度の差、 $\Delta M$  は2つの衛星の緯度引数（昇交点からの離角）の差である。傾斜軌道の場合には、緯度引数の差  $\Delta M$  が0であっても公転位相差  $\beta_i$  が生じる。

$$\beta_i = \pi - 2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{\cos i \tan(\Delta\Omega/2)} \right) \quad (5)$$

ここで、 $i$ は軌道傾斜角である。また、 $\alpha$ は $\Delta\Omega$ よりも小さくなる。傾斜軌道の場合の $\alpha$ と $\beta$ は、それぞれ

$$\alpha = \cos^{-1}(\sin^2 i \cos \Delta\Omega + \cos^2 i) \quad (6)$$

$$\beta = \Delta M + \pi - 2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{\cos i \tan(\Delta\Omega/2)} \right) \quad (7)$$

となる。

互いに逆方向に運動しながらすれ違う2機の衛星間の通信特性に關与するパラメータは、 $h$ と軌道間隔 $\alpha'$ 、および公転位相差 $\beta$ である。この場合の衛星軌道の位置関係と關連する軌道パラメータを図4に示す。極軌道の場合には、2つの軌道の昇交点経度の差を $\Delta\Omega'$ 、2機の衛星の緯度引数をそれぞれ $M_1$ 、 $M_2$ とすると、 $\alpha'$ と $\beta$ は

$$\alpha' = \pi - \Delta\Omega' \quad (8)$$

$$\beta = \Delta M = M_2 - M_1 \quad (9)$$

で表される。一方、傾斜軌道の場合には、

$$\alpha' = \cos^{-1}(\sin^2 i \cos(\pi - \Delta\Omega') - \cos^2 i) \quad (10)$$

$$\beta = M_2 - M_1 + \pi - 2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{\cos i \tan(\Omega'/2)} \right) \quad (11)$$

となる。極軌道の場合には $\alpha' = 0$ ですれ違うことも可能であるが、傾斜軌道の場合には(10)式から明らかのように、 $\alpha'$ は

$$\pi - 2i \leq \alpha' \leq \pi \quad (12)$$

の範囲内の値しかとることができない。 $\alpha'$ が $\pi$ に近い値をとる場合には、図3と同様の状態になり同期運動することになる。しかしながら、衛星高度が低い場合には、常時衛星間リンクを張ることができず、軌道の交差点付近でのみ相手衛星が可視の状態にあるような条件下では、実質的に逆方向交差と同等であると見なすことができる。

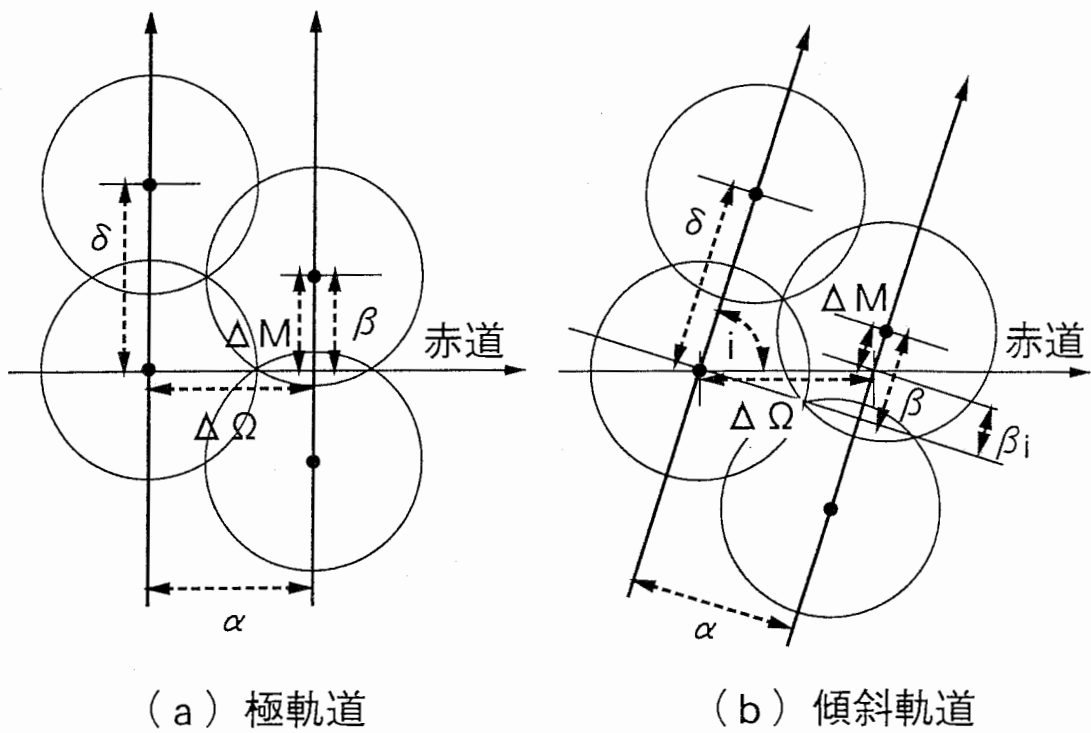


図 3: 同期して運動する衛星軌道に関するパラメータ

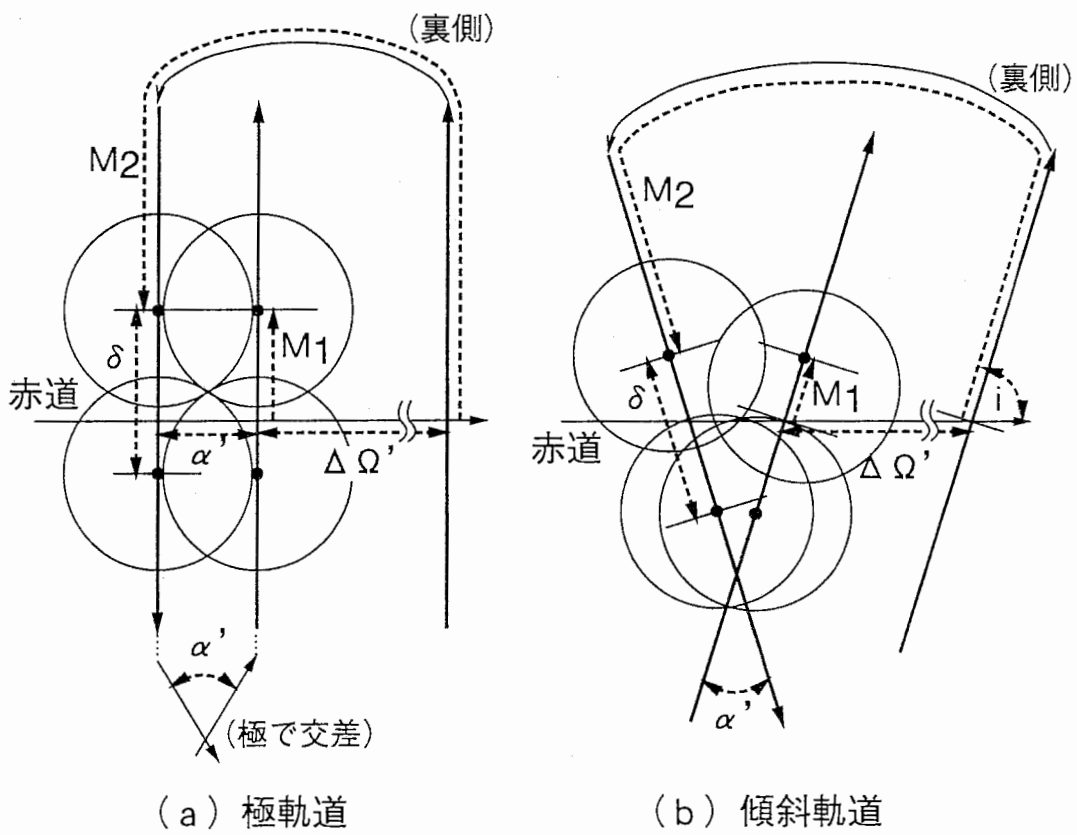


図 4: 逆方向に運動してすれ違う衛星軌道に関するパラメータ



### 2.3. 衛星間通信の可視範囲

図1から明らかなように、衛星間通信の通信路の最低高度  $h'$  は衛星高度  $h$  よりも低くなる。地球中心から見た2機の衛星の離角を  $\gamma$  とすると、

$$h' = (R + h) \cos(\gamma/2) - R \quad (13)$$

である。 $h' \leq 0$  の場合には通信路が地球に遮られて通信が不可能であり、 $h'$  が小さい場合には通信路が大気中を通ることになって、伝搬損失の増加や波面ゆらぎを受ける。許容する通信路最低高度を  $h'_{min}$  とすると、衛星間通信が可能な2衛星の最大離角  $\gamma_{max}$  は、(13)式より、

$$\gamma_{max} = 2 \cos^{-1} \left( \frac{R + h'_{min}}{R + h} \right) \quad (14)$$

で与えられる。 $h'$  が0kmの場合と200kmの場合の最大衛星間離角を図5に示す。本パラメータ評価においては、 $h'=200\text{km}$  を仮定した。

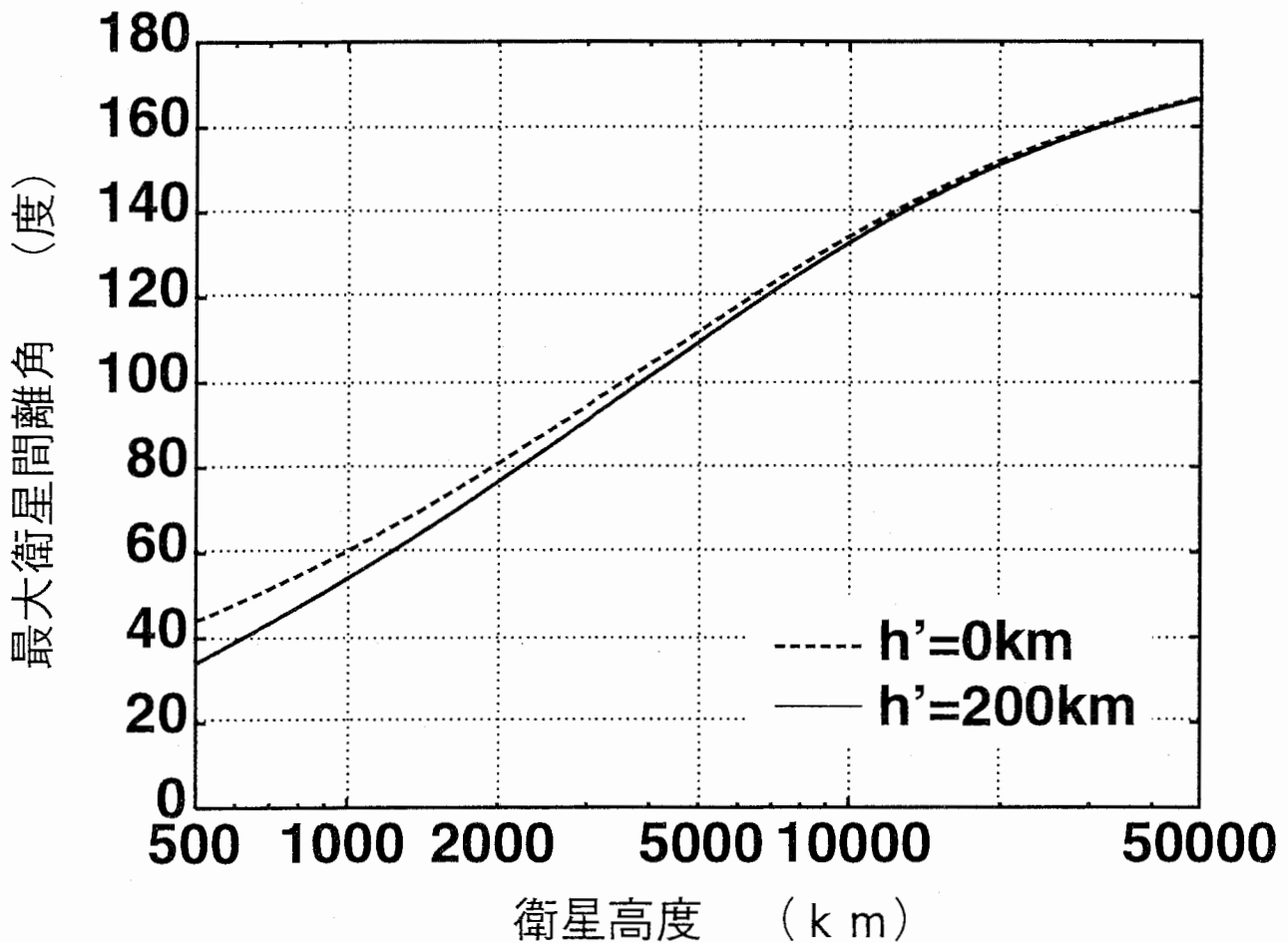


図5: 衛星間通信が可能な最大離角

### 3. 光衛星間通信の特性パラメータ

光衛星間通信の特性に影響を与えるパラメータで、衛星の軌道運動に依存するものとしては、衛星間距離、関与する2衛星の相対速度、光行差補正角、衛星可視時間、追尾角速度および追尾範囲などがある。

衛星間距離が増加すると衛星間通信における自由空間損失も増大するため、衛星間距離は回線設計上の重要なパラメータである。衛星間距離を $r$ 、使用する光の波長を $\lambda$ とすると、自由空間損失 $L(\text{dB})$ は、

$$L = 10 \log \left( \frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (15)$$

で与えられる。衛星間通信に使用する光の波長として $\lambda=830\text{nm}$ を仮定すると、自由空間損失は $r=2000\text{km}$ に対して約270dB、 $r=20000\text{km}$ に対して約290dBとなる。口径20cmの光アンテナを使用して強度変調/直接検波(IM/DD)方式で2.5Gbpsの通信を行なうためには、 $r=2000\text{km}$ の場合で約10mW、 $r=20000\text{km}$ の場合で約1Wの送信器出力が必要になる[9,10]。また、衛星間距離の変動により自由空間損失が変動するため、最大距離と最小距離の比が大きいかほど受信光強度の変動が大きくなり、入力光に対するダイナミックレンジの大きい受信器が必要になる。このダイナミックレンジ $L_{\text{dyn}}(\text{dB})$ は、最大距離と最小距離をそれぞれ $r_{\text{max}}$ 、 $r_{\text{min}}$ とすると、

$$L_{\text{dyn}} = 20 \log \left( \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}} \right) \quad (16)$$

で与えられる。

2衛星の相対速度については、ドップラシフトの原因となる視線方向の速度が重要である。IM/DD方式の場合にはほとんど問題にならないが、コヒーレント方式の場合は周波数追尾が必要となる。ドップラシフト $\Delta f$ は、送信光の周波数を $f$ 、視線方向の相対速度を $v_{\parallel}$ 、光速を $c$ として、

$$\Delta f = \left( \frac{v_{\parallel}}{c + v_{\parallel}} \right) f \quad (17)$$

で表される。 $\lambda=830\text{nm}$ ( $f \approx 360\text{THz}$ )で $v_{\parallel}$ のとり得る範囲が $\pm 10\text{km/s}$ の場合は、およそ $\pm 12\text{GHz}$ の周波数追尾範囲をもつ必要がある。

光速が有限であるため、相手衛星からの光の到来方向に光ビームを送信すると、光が届いた時には既に相手衛星は移動していて、もはやその場所には存在せず、非常に細い光ビームを使う光衛星間通信では通信路が形成できなくなる。このため、相手衛星の運動を見込んで到来方向よりも少し前方に光を送信する必要がある。このオフセット量が光行差補正角 $\delta_{\text{pa}}(\text{rad})$ で相対速度の視線に垂

直な面内の成分を  $v_{\perp}$  とすると、

$$\delta_{pa} = \frac{2v_{\perp}}{c} \quad (18)$$

で表される。一例として、光学倍率 30 倍の光アンテナの内部光学系に光行差補正系を組み込む場合、光行差補正角の最大値が  $100 \mu \text{ rad}$  であると仮定すると、送信光の出射角の調整範囲は約  $\pm 0.17$  度必要になる。

衛星間通信における衛星可視時間に関しては、互いに逆方向に運動する衛星間の通信において重要なパラメータである。同一軌道面内の衛星間通信や同期運動する衛星間の通信の場合は、常時可視の状態にあり、安定した通信リンクの形成が可能で好都合である。

追尾角速度と追尾範囲は光ビームの捕捉追尾系を構成する上での重要なパラメータである。追尾速度  $\omega(\text{rad})$  自体は

$$\omega = \frac{v_{\perp}}{r} \quad (19)$$

で与えられるが、光アンテナをマウントするジンバルの各軸についての駆動速度は、ジンバルの構成および軸の配置に強く依存する。例えばアジマス・エレベーション構成のジンバルで、アジマス軸の方向（エレベーションが  $\pm 90$  度の方向）を相手の衛星が通過する場合には、ジンバルロックが発生し駆動速度が極端に大きくなる。同一高度にある衛星間の通信では、相手の衛星が地球中心の方向や反地球方向にくることはないので、ジンバルのアジマス軸を天頂方向（反地球方向）に向けるのが適当である。このようなジンバル軸配置をとれば、アジマス軸回りの方位角方向の追尾が中心になり、仰角方向の追尾範囲や追尾速度を小さくすることができる。そこで、図 6 に示すように方位角および仰角を定義し、追尾範囲と追尾速度の評価を行なった。このように仰角  $El$  を定義すると、仰角は 2 衛星の離角  $\gamma$  の関数となり、

$$El = -\gamma/2 \quad (20)$$

という関係が成り立つ。

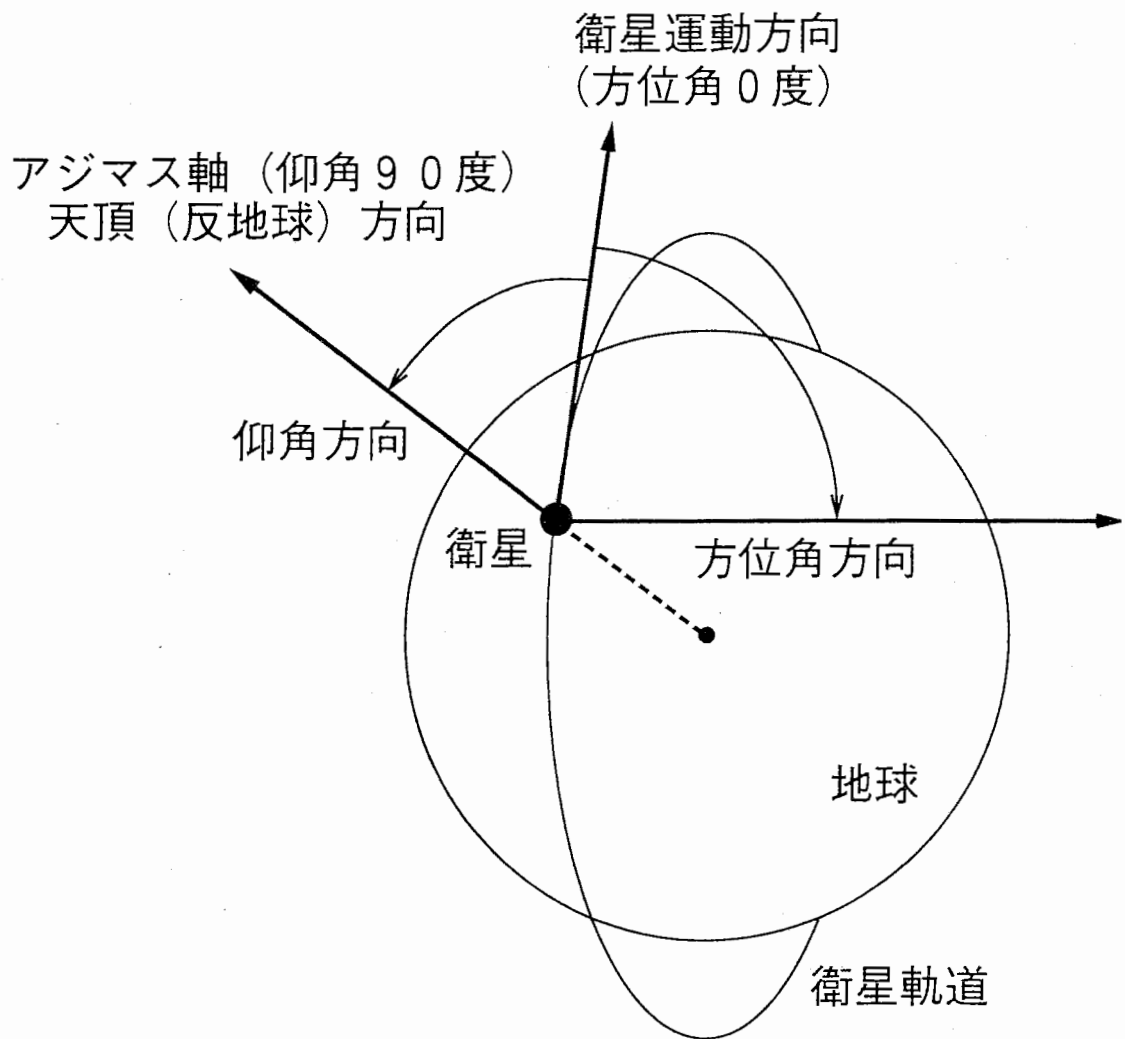


図 6: 捕捉追尾系ジンバルのアジマス軸の方向と、方位角および仰角の定義

## 4. パラメータ評価結果

### 4.1. 同一軌道面内の衛星間通信

同一軌道面内の衛星間通信では、軌道の保持誤差や摂動等によるわずかな変動がある以外は、衛星の相互の位置関係は一定に保たれる。したがって、常時

$$Az = 0 \text{ or } \pi \quad (21)$$

$$El = -\delta/2 \quad (22)$$

となる。ドップラシフトもなく、常時可視の状態にある。衛星間距離や光行差補正角も一定である。6つの軌道高度について、衛星間距離と衛星間隔の関係、および光行差補正角と衛星間隔の関係をそれぞれ図7、図8に示す。高度35786kmは静止軌道の場合に相当する。図3のような衛星配置を考える場合には、3つの衛星を正三角形に配置すると最も効率がよいことから、 $\delta$ が $\sqrt{3}\phi$ に最も近くなるように $s$ を選ぶことになる。地上から見た最小仰角 $\theta$ が10度の場合と30度の場合について、この方法で $s$ を求め、図中にそれぞれ丸印、四角印で示した。図中の衛星間隔と軌道面内衛星数の対応は、隣接した衛星間で通信を行なうことを前提にしたものである。2つ以上先の衛星と通信を行なう場合には、対象となる2衛星の間隔に基づいてこれらの図を見る必要がある。曲線が存在しない衛星間隔に対しては、相手の衛星が可視範囲にないことを意味する。

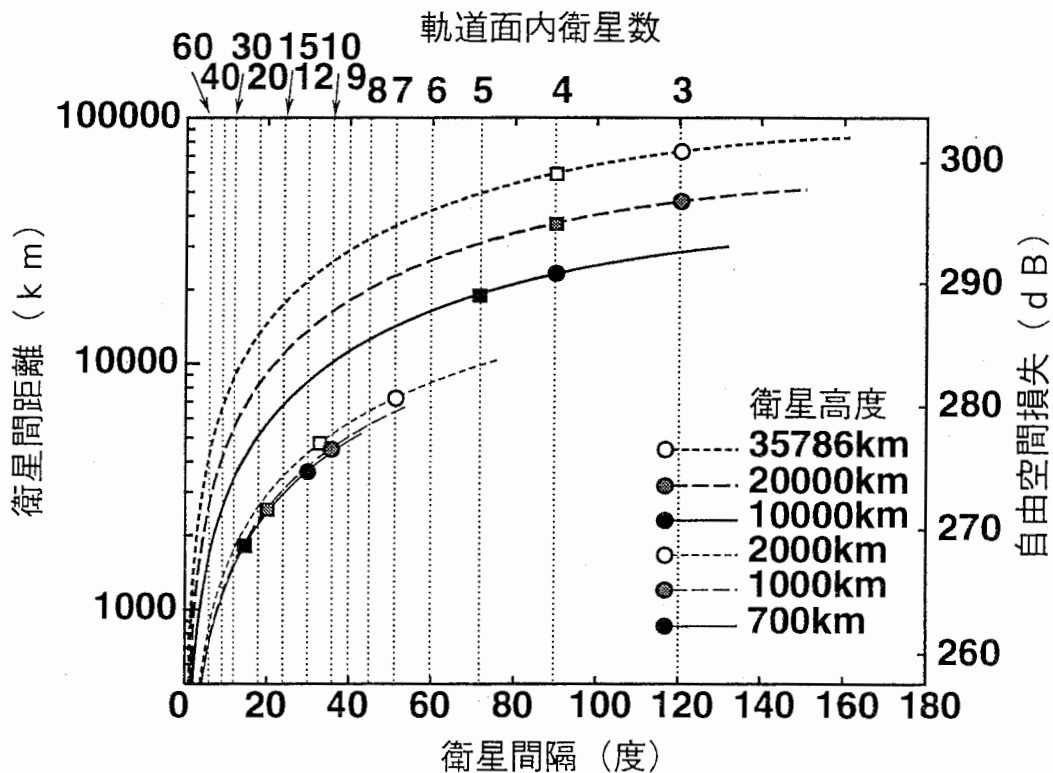


図7: 同一軌道面内の衛星間通信における衛星間距離

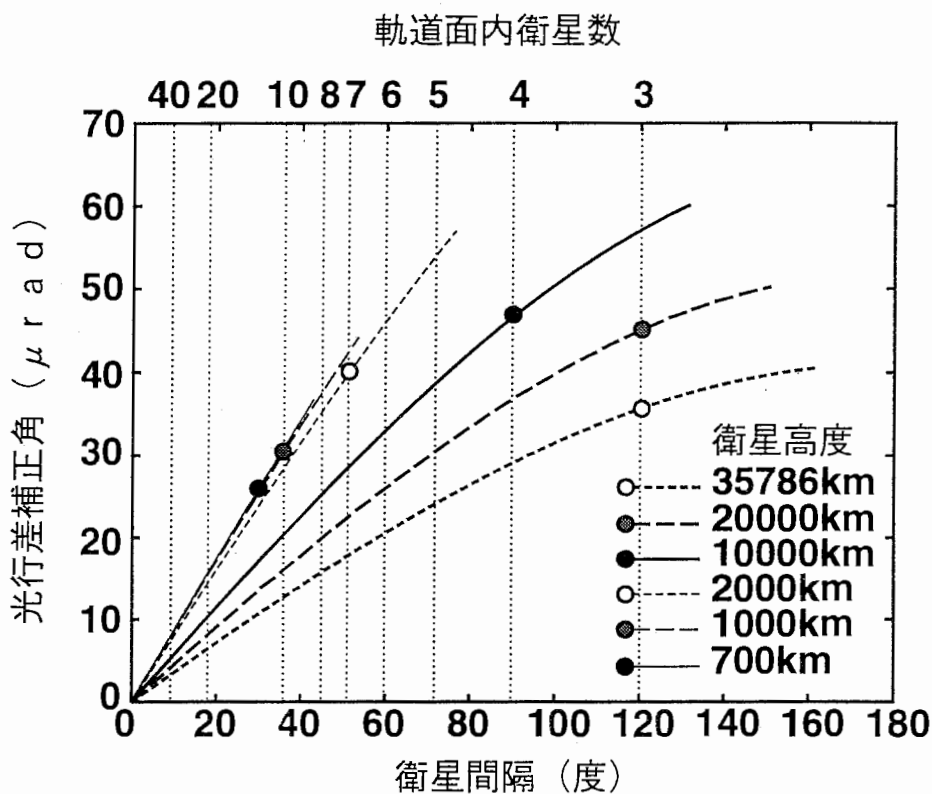


図 8: 同一軌道面内の衛星間通信における光行差補正角

#### 4.2. 同期して運動する衛星間の通信

同期運動する軌道面間の衛星間通信に関して、LEOとMEOの代表的な軌道高度における各種のパラメータを以下に図で示す。これらの図の横軸には軌道間の公転位相差 $\beta$ をとっている。各高度について、曲線が途切れる $\beta$ の値よりも大きな公転位相差をとると、連続的に可視範囲にあるという条件を満たさなくなる。図3のような衛星配置を用いる場合は、 $\alpha = (3/2)\phi$ 前後になるように $\alpha$ をとると配置効率がよい。そこで最小仰角 $\theta$ を30度とした場合の $\phi$ を(1)式を用いて求め、その1.5倍に最も近い整数値を $\alpha$ として用いてパラメータ評価を行なった。評価に用いた軌道高度と衛星間隔を表1に示す。

図9には衛星間距離の最小値と最大値を示す。一般的には、相手の衛星が自分の軌道の横切るあたりで距離が最小になり。2つの軌道が最も離れた部分付近を通過している時に距離が最大になる。図10には相対速度の視線方向成分の絶対値の最大値を示す。一般的には相手の衛星が自分の軌道を横切る前後にそれぞれ負の最大値と正の最大値をとり、その絶対値は等しい。図11には光

表 1: パラメータ評価に用いた衛星高度と軌道間隔

衛星高度 $h(\text{km})$	カバレッジ半径 $\phi(\text{度})$	軌道間隔 (同期) $\alpha(\text{度})$	軌道間隔 (逆行) $\alpha'(\text{度})$
700	8.70	13	9
1000	11.53	17	12
2000	18.75	28	19
10000	40.29	60	40
20000	47.91	72	48

行差補正角の最大値を示す。完全に  $\beta$  が 0 であれば光行差補正角は常に 0 であるが、 $\beta$  が 0 からずれると光行差補正角は図の曲線の左端の値まで急激に大きくなる。図 1 2 には方位角の追尾範囲を示す。図 6 に示す座標系をとることにより、最大値と最小値の絶対値は等しくなる。つまり、自分の軌道を横切るときに 0 になり、最大値をとった後逆向きに軌道を横切るときに再び 0 になり、最小値 (負の方向の最大値) をとったあと最初の位置に戻ってきて 0 になるということを軌道周期毎に繰り返す。 $\beta < 0$  の場合は、相手衛星は常に自分の後方に存在することになるため、方位角は 180 度を中心にして同様の変動をすることになる。図 1 3 には方位角変化率の絶対値の最大値を示す。下側の図は、上側の図で曲線が込み入っている  $\beta < 20$  度の部分を拡大したものである。相手の衛星が自分の衛星の軌道を横切るあたりで方位角の変化率が最大になる。 $\beta$  が小さいと軌道を横切るときの衛星間の距離が小さいため、方位角の変化率は極端に大きくなる。図 1 4 には仰角の追尾範囲を示す。(20) 式から明らかなように、仰角は衛星間距離に対する単調減少関数になっており、一般的には相手の衛星が自分の軌道を横切るあたりで最大値をとり、軌道が離れて距離が最大になったときに最小値をとる。図 1 5 には仰角変化率の絶対値の最大値を示す。図 6 に示したような仰角方向の変動が小さくなるジンバル軸配置をとっているため、仰角の変化率は方位角の変化率に比べるとかなり小さい。

軌道高度が 700km と 10000km の場合について、代表的な軌道間隔  $\alpha$  に対して上記の全てのパラメータを評価した結果を図 1 6 ~ 図 2 9 に示す。但し軌道間隔依存性の小さい一部のパラメータについては、曲線を間引いて表示している。軌道間隔が大きくなるにつれて、最大衛星間距離、自由空間損失のダイナミックレンジ、相対速度、光行差補正角、追尾範囲および追尾速度のいずれのパラメータも、大きくなっていく傾向が見られる。

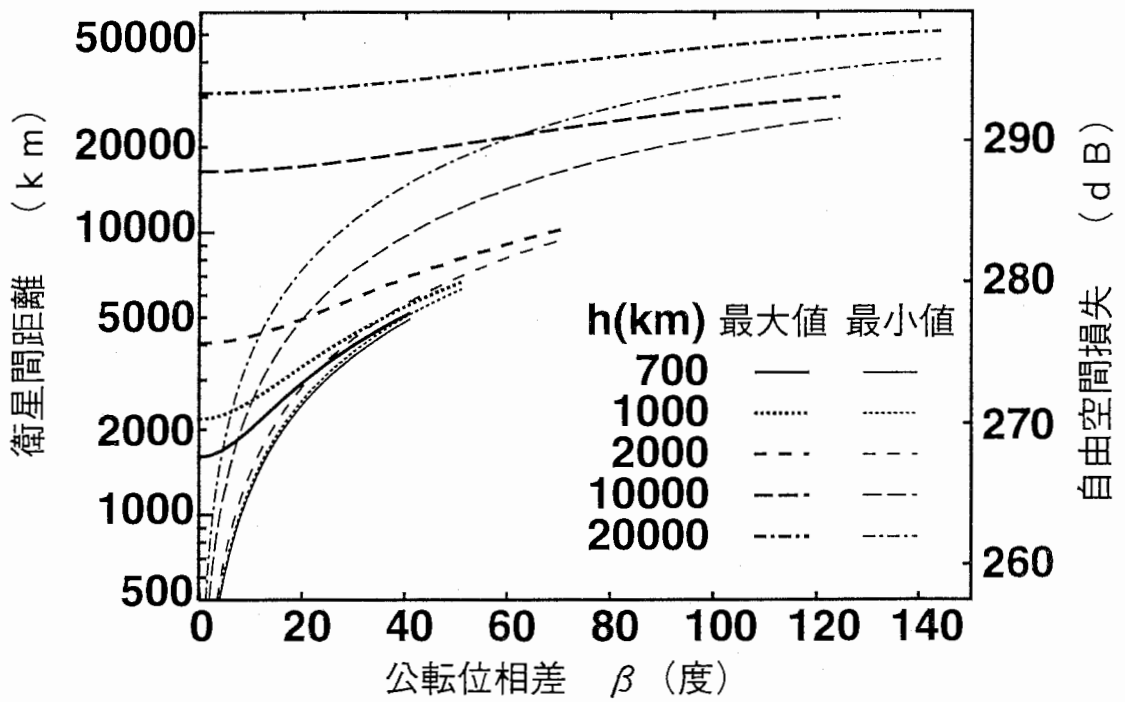


図 9: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離

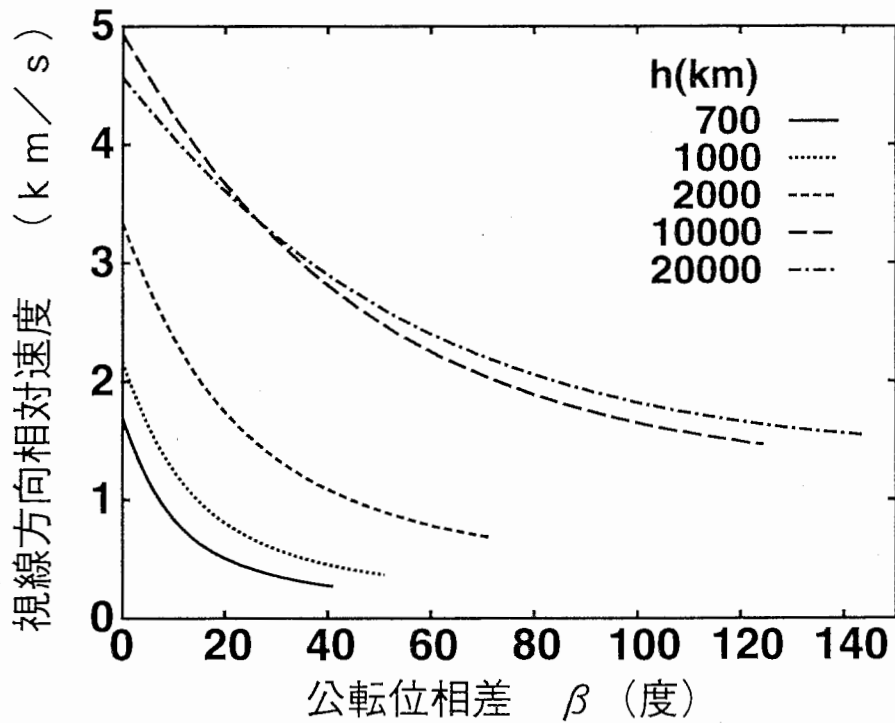


図 10: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度



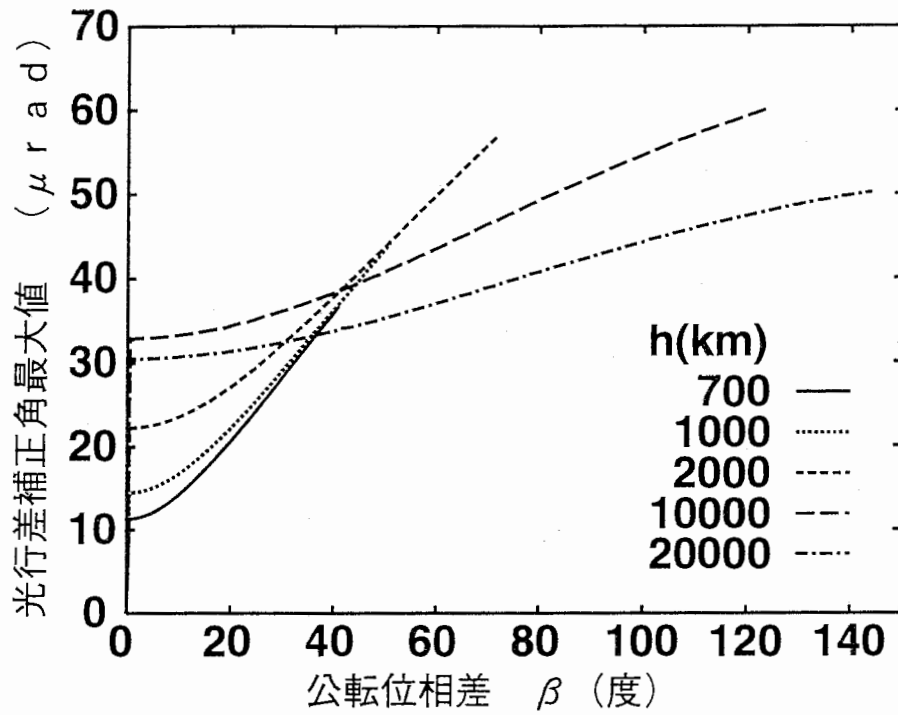


図 11: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角

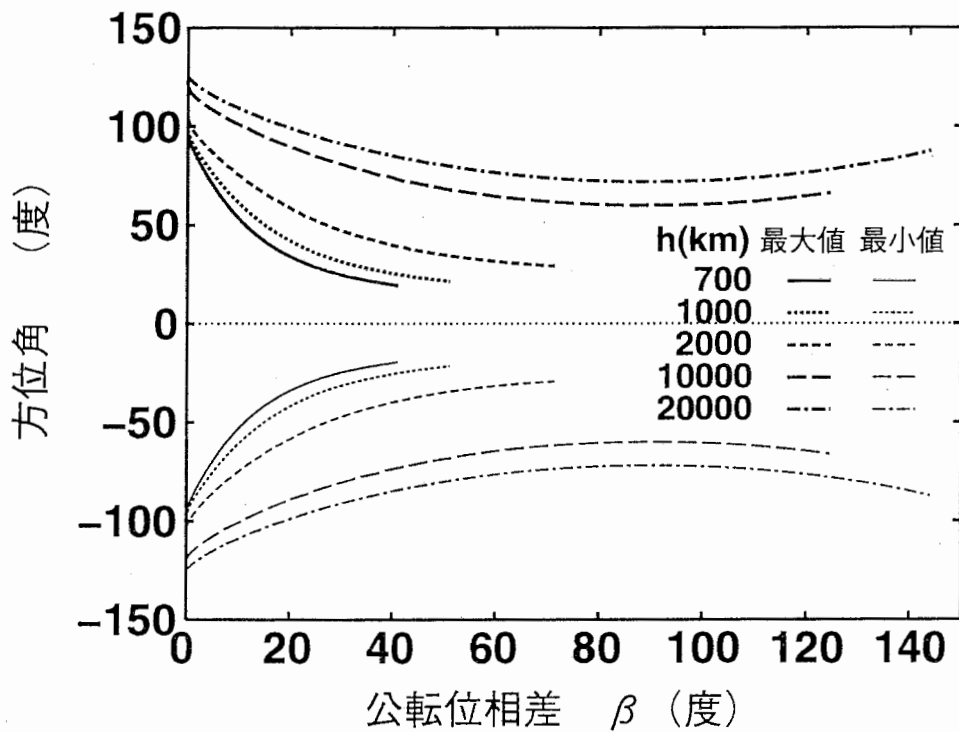


図 12: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲

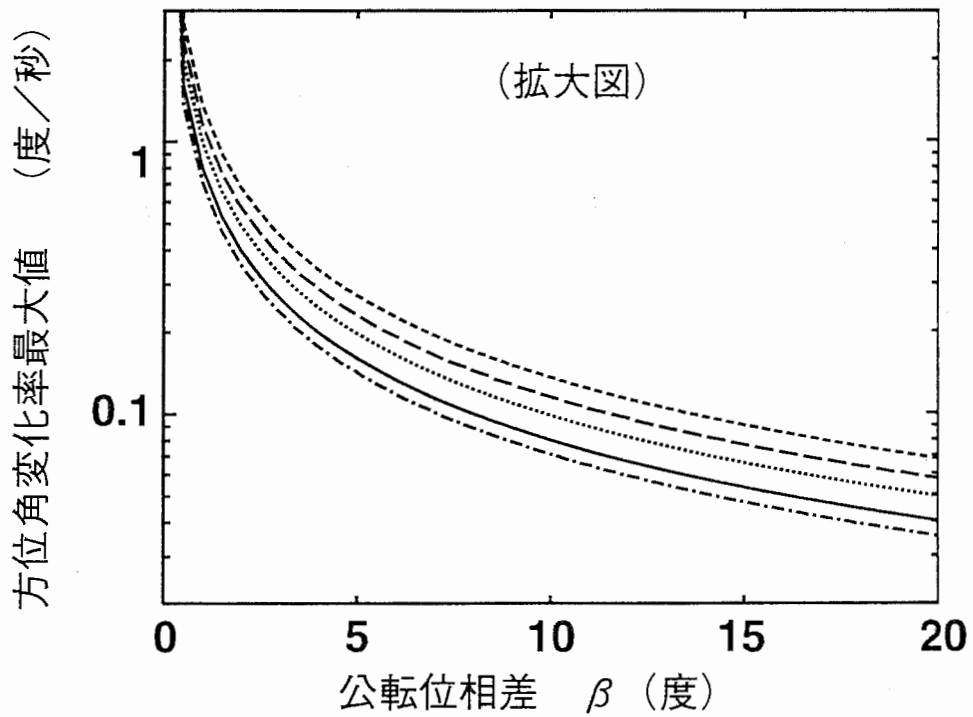
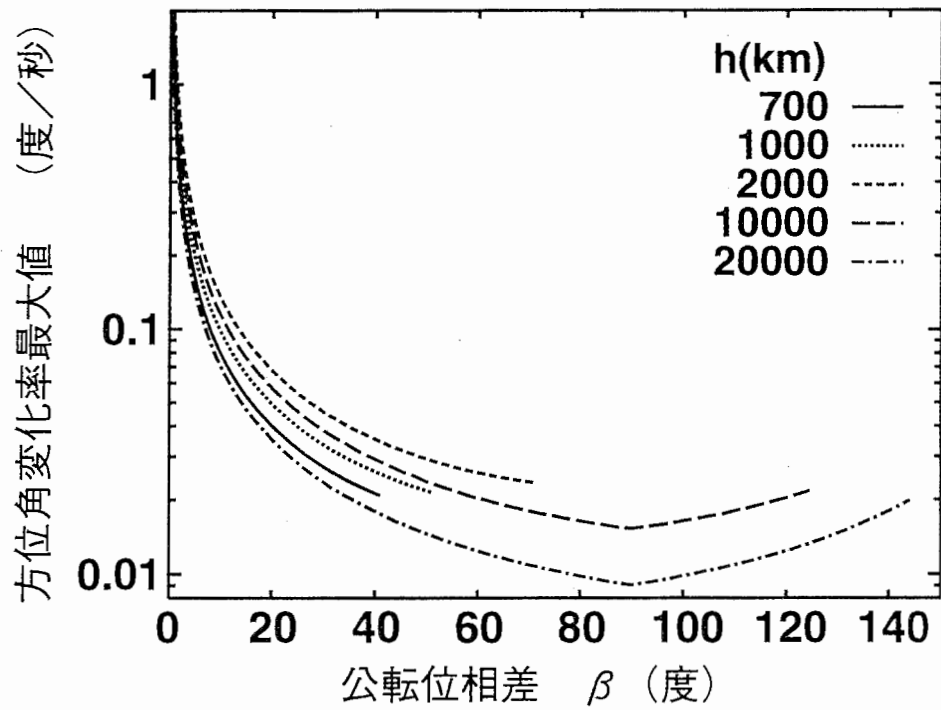


図 13: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度

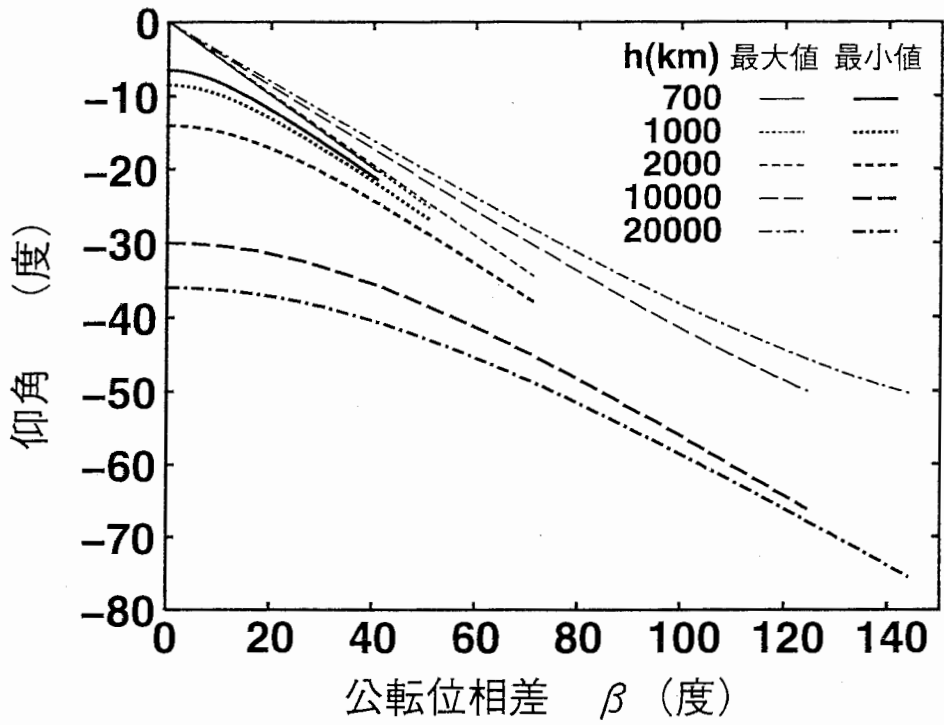


図 14: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲

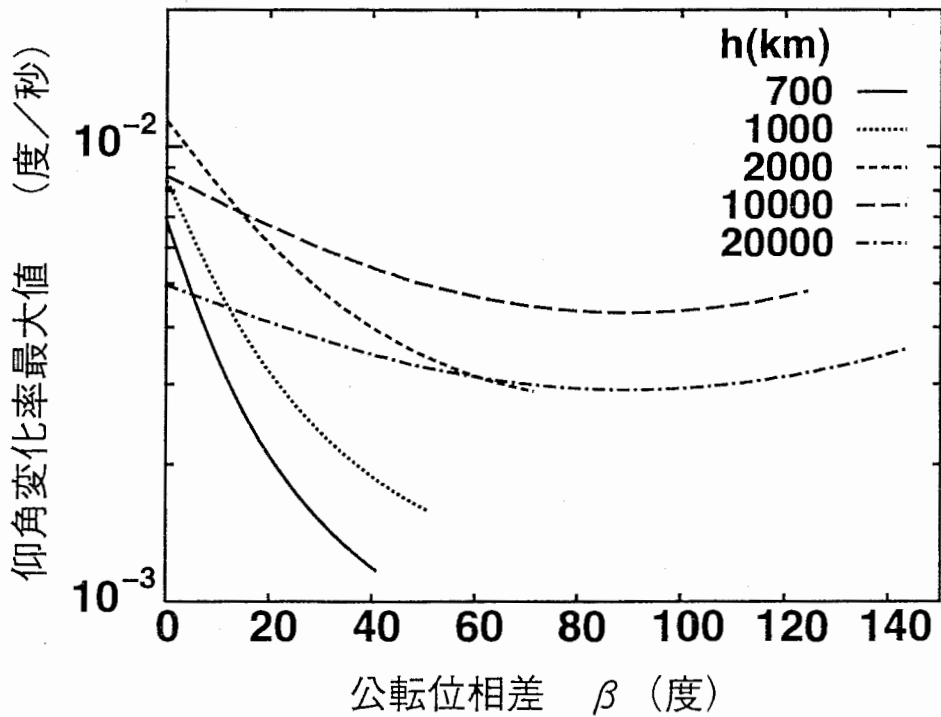


図 15: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度

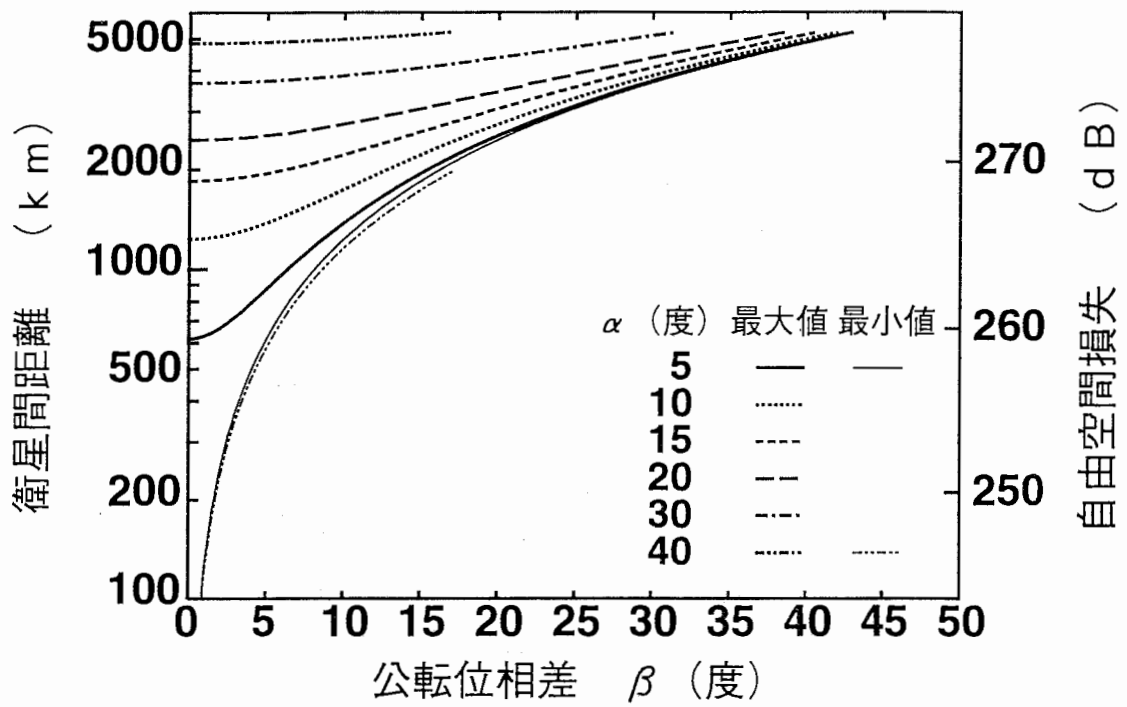


図 16: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離 ( $h=700\text{km}$ )

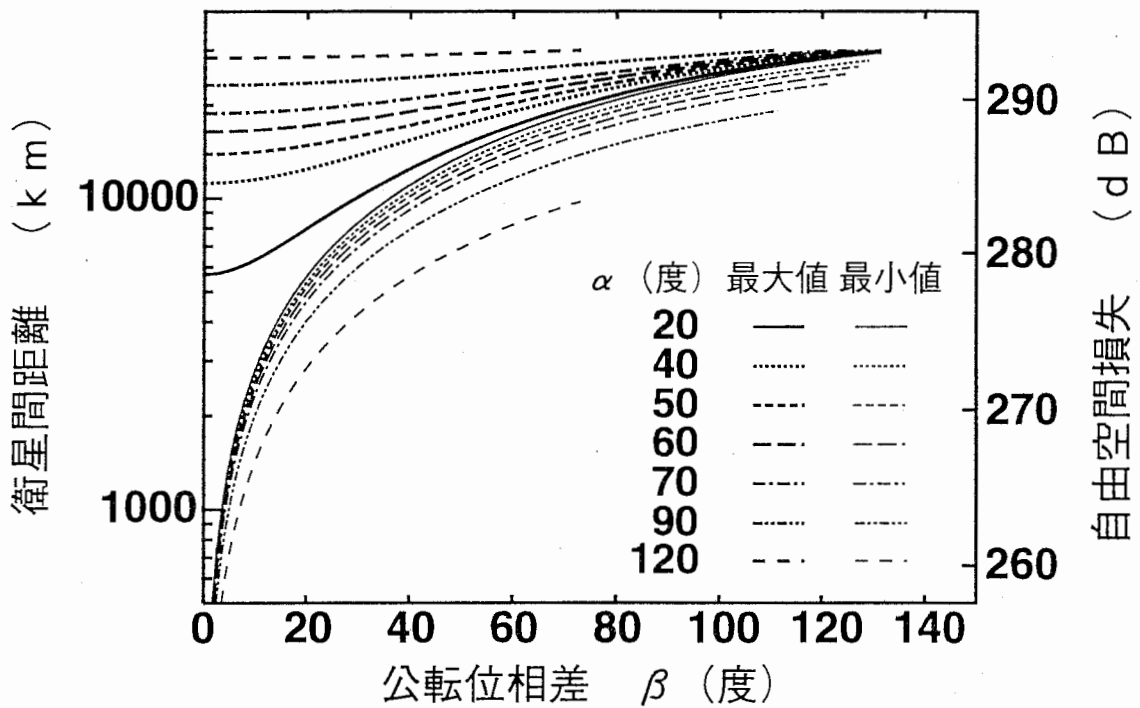


図 17: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離 ( $h=10000\text{km}$ )

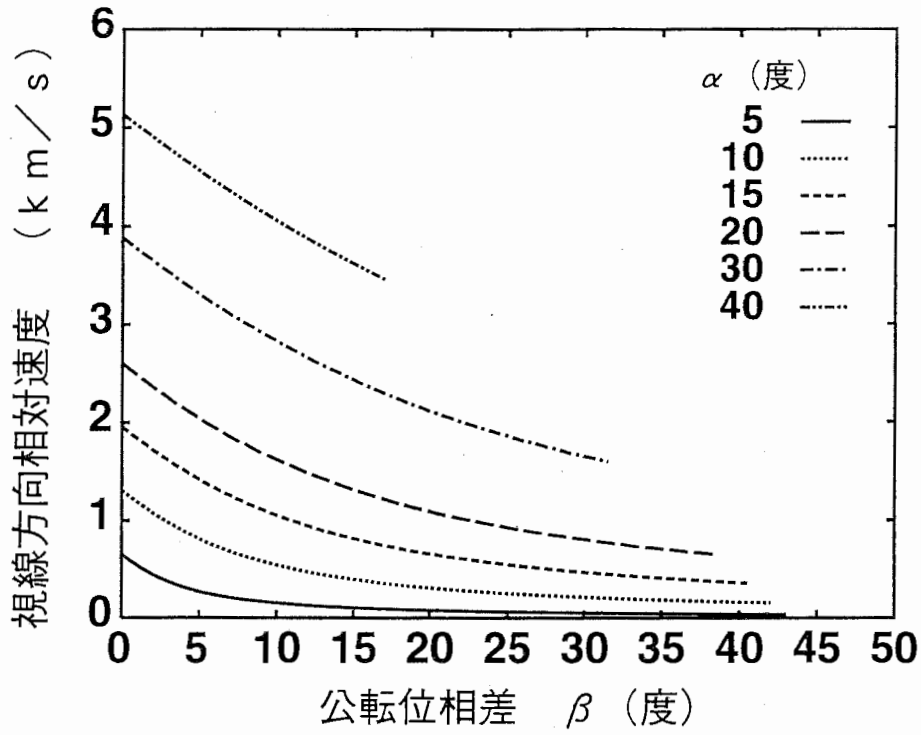


図 18: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度 ( $h=700\text{km}$ )

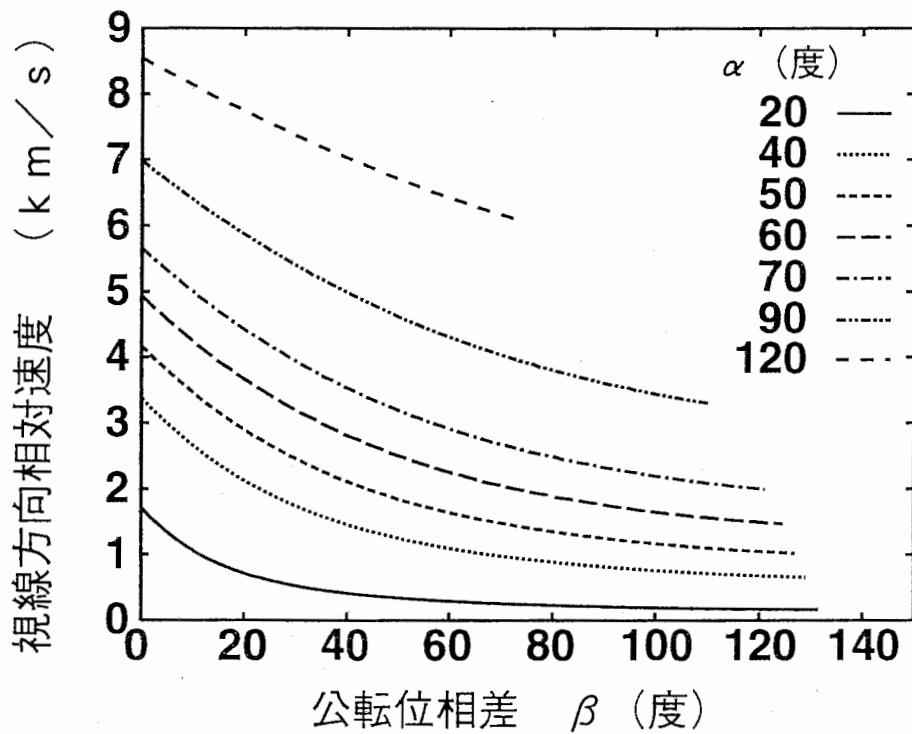


図 19: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度 ( $h=10000\text{km}$ )

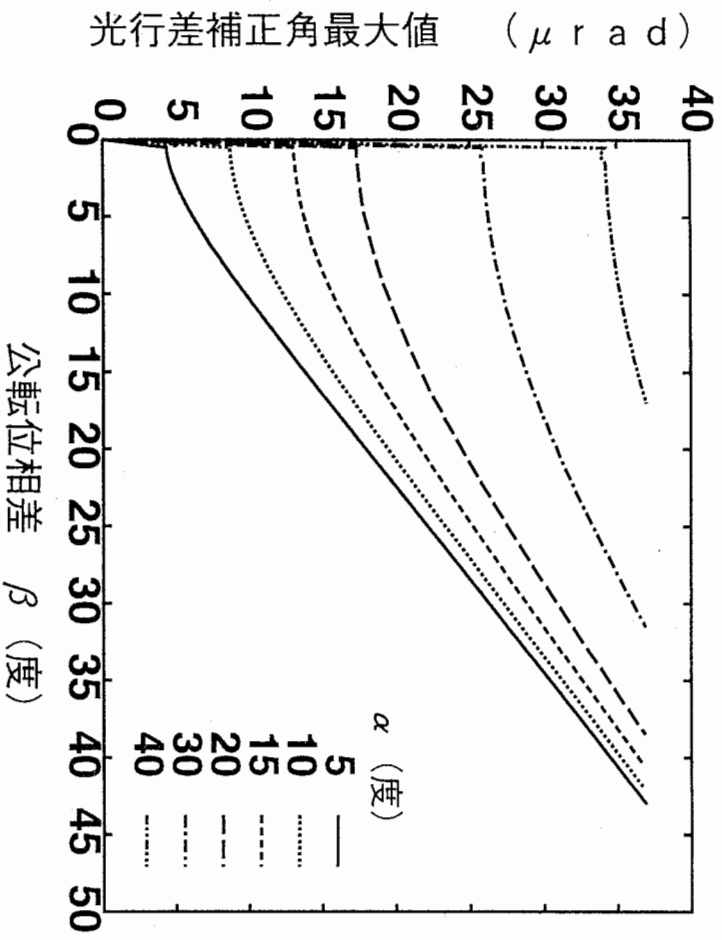


図 20: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角 ( $h=700\text{km}$ )

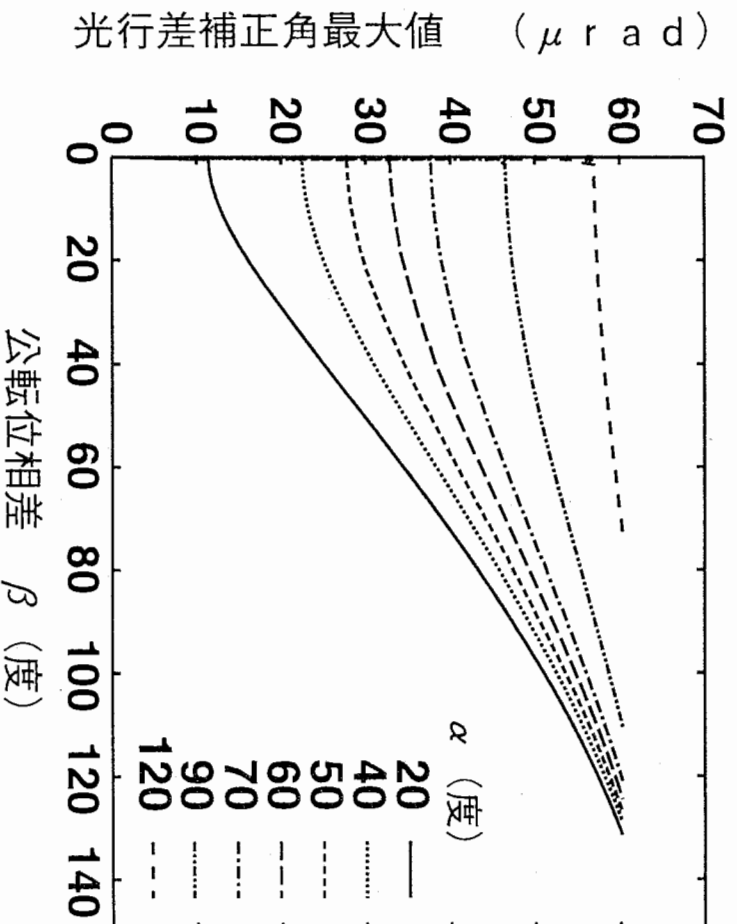


図 21: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角 ( $h=10000\text{km}$ )

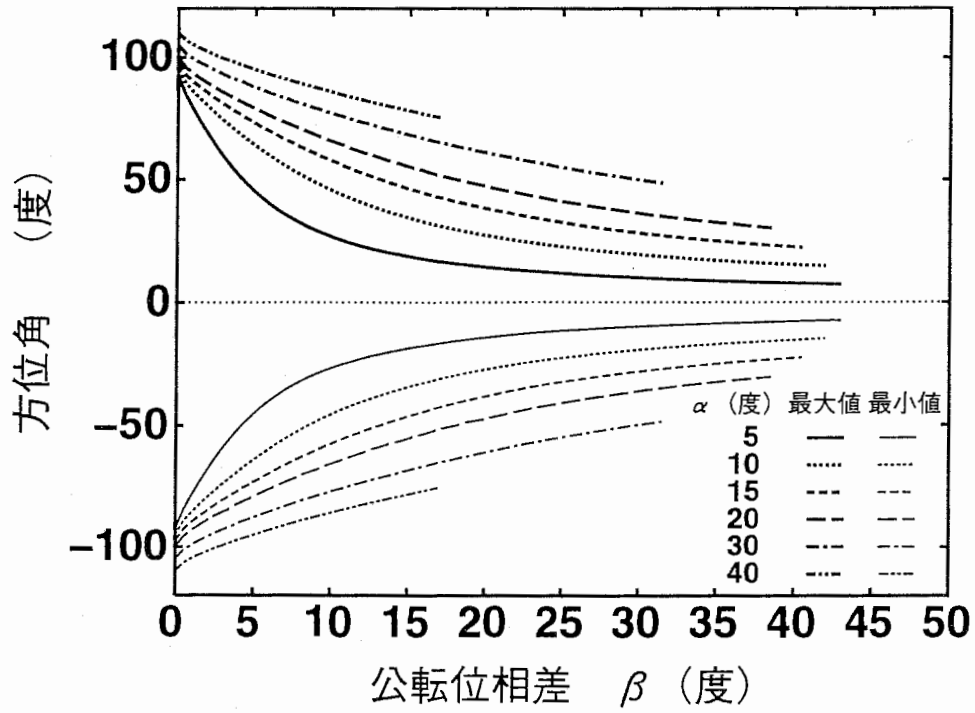


図 22: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲 ( $h=700\text{km}$ )

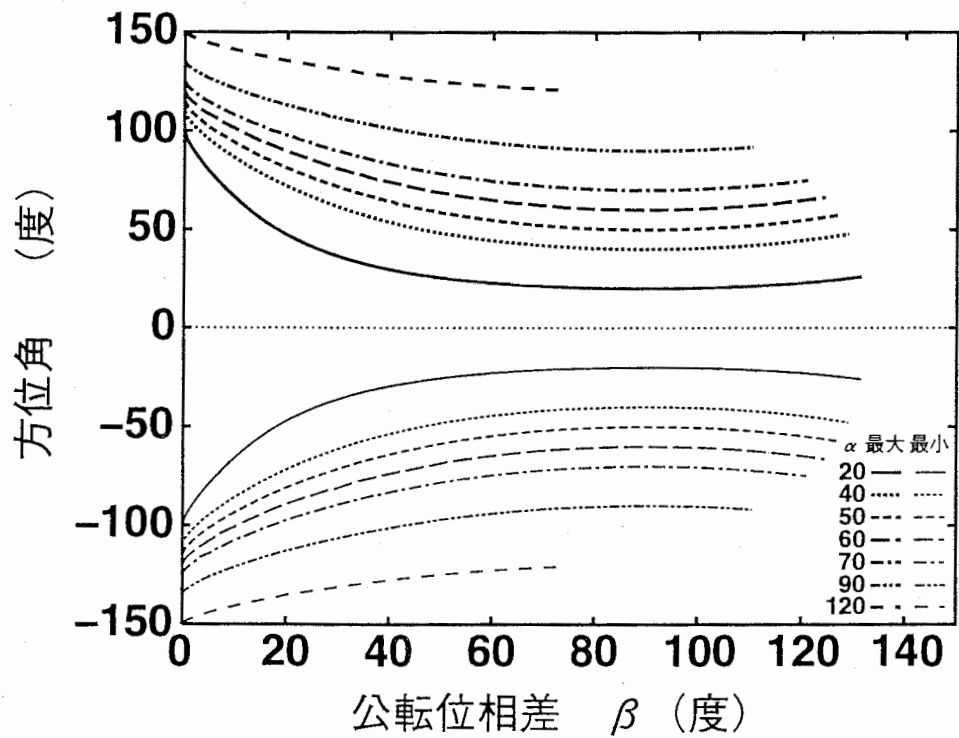


図 23: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲 ( $h=10000\text{km}$ )

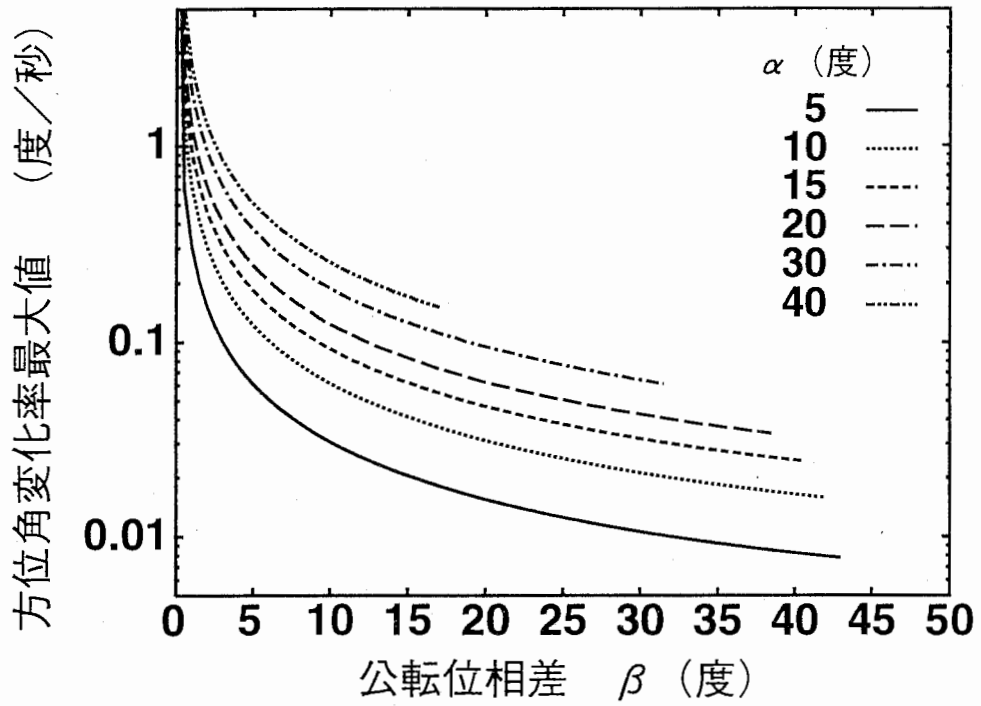


図 24: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度 ( $h=700\text{km}$ )

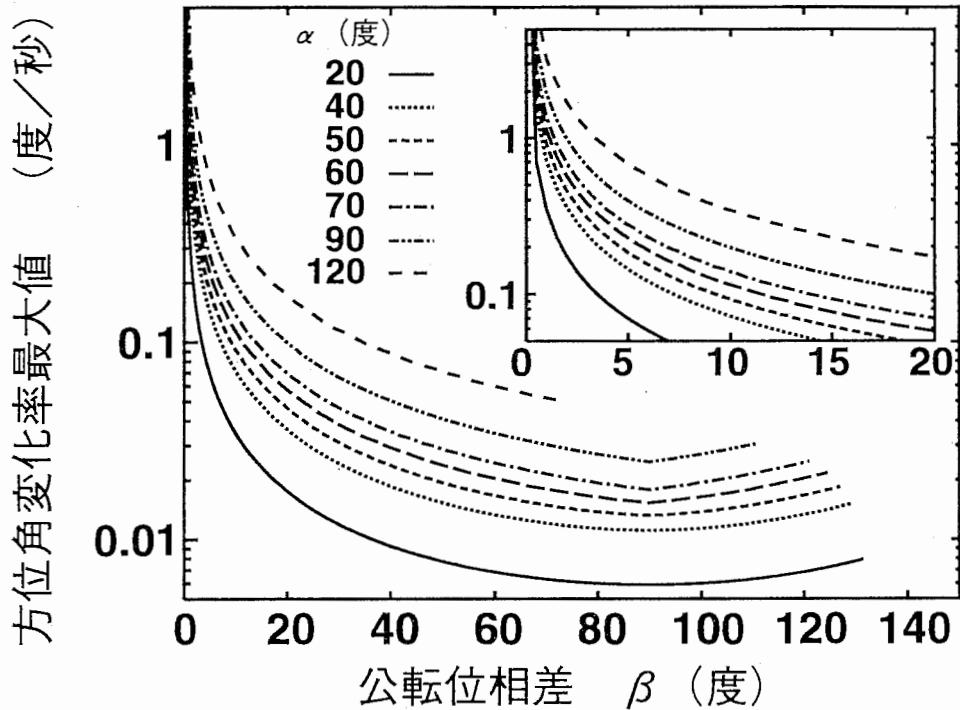


図 25: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度 ( $h=10000\text{km}$ )



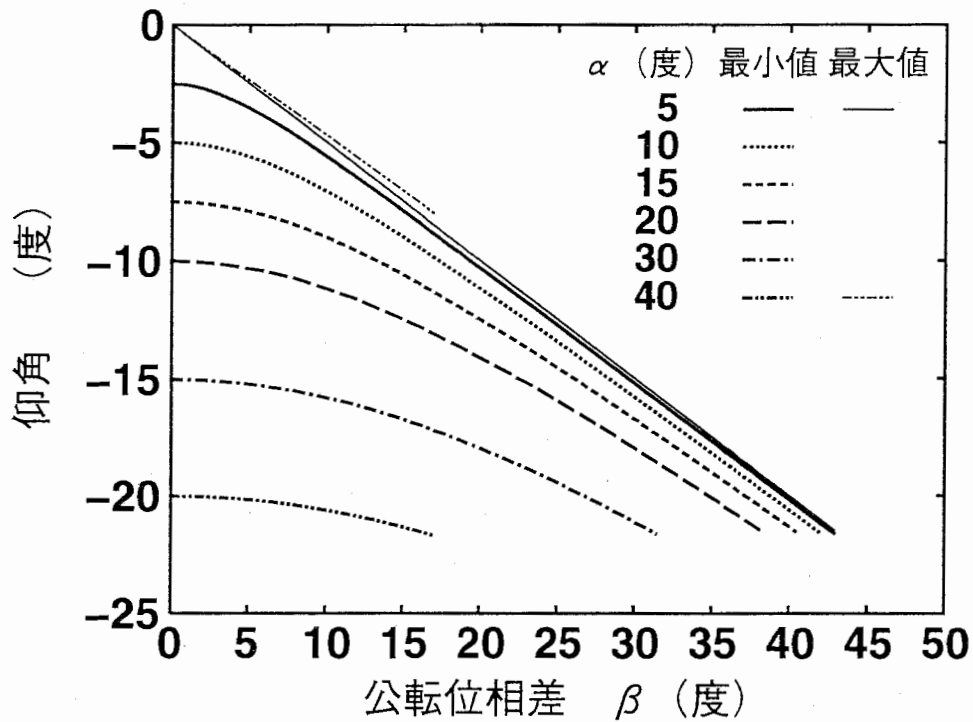


図 26: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲 ( $h=700\text{km}$ )

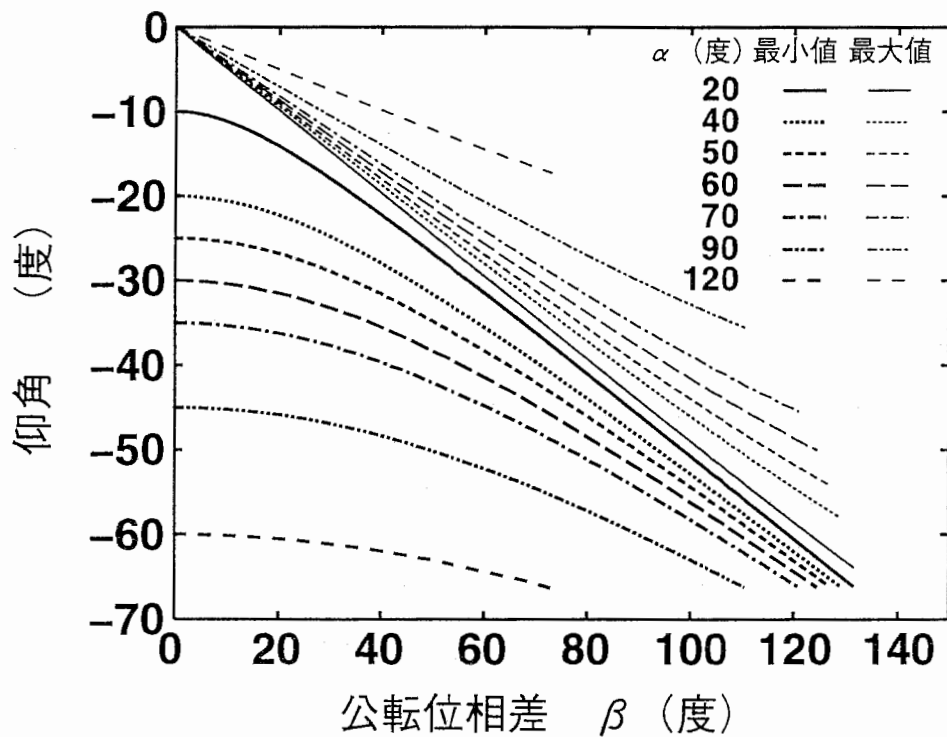


図 27: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲 ( $h=10000\text{km}$ )

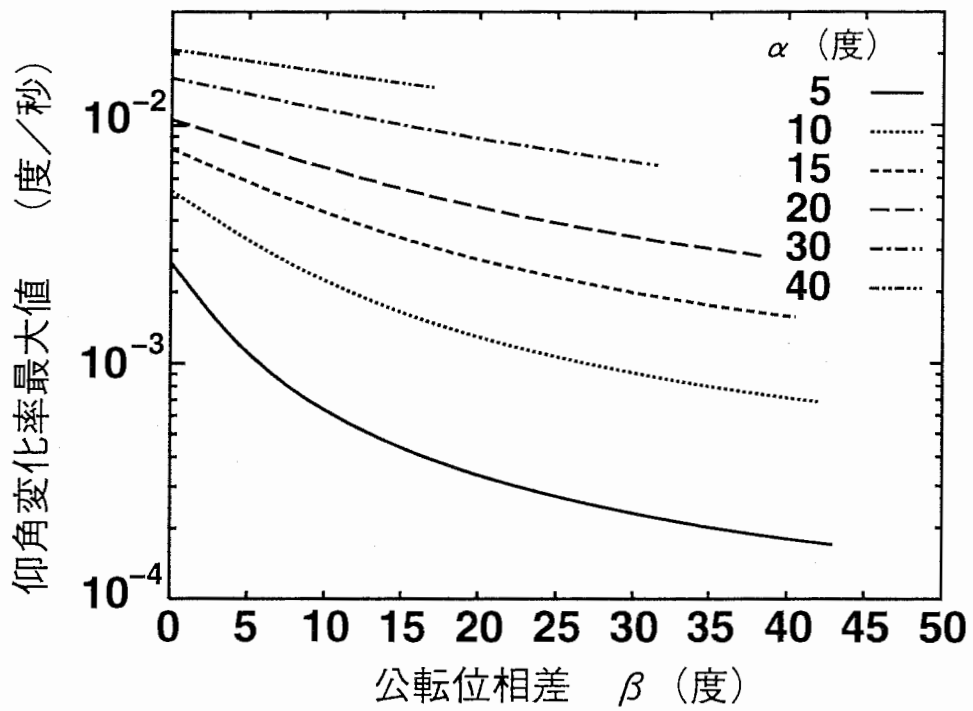


図 28: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度 ( $h=700\text{km}$ )

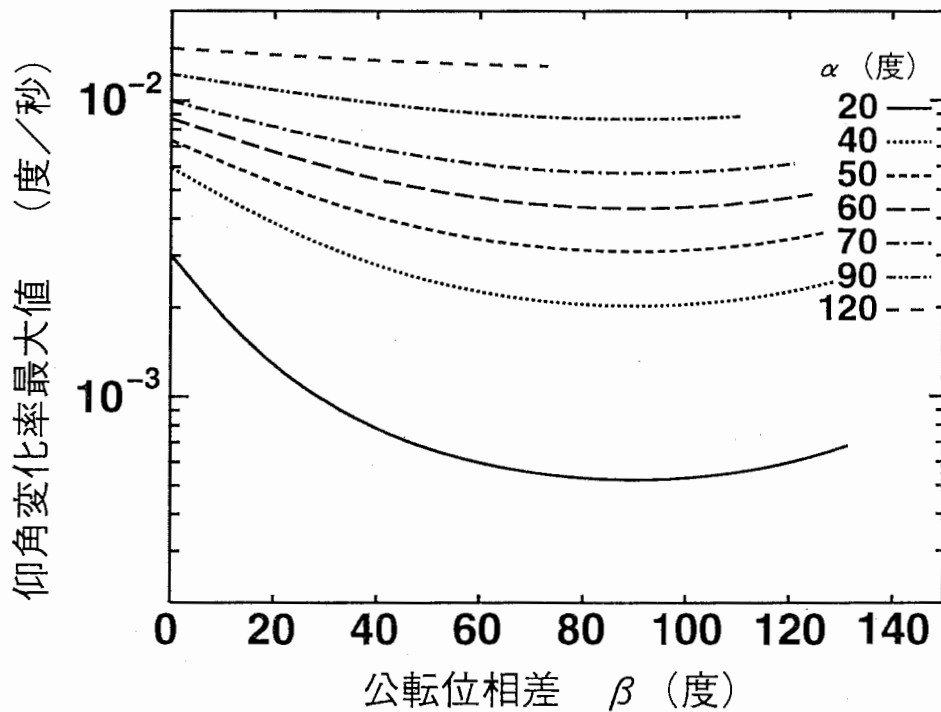


図 29: 同期運動する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度 ( $h=10000\text{km}$ )

### 4.3. 互いに逆方向に運動してすれ違う衛星間の通信

軌道上の衛星が互いに逆方向に運動しながら交差するような2つの軌道面の間での衛星間通信に関して、LEOとMEOの代表的な軌道高度における各種のパラメータを評価した。その結果を図30～図37に示す。前節と同様に、これらの図の横軸には軌道間の公転位相差 $\beta$ をとっているが、この場合には $\beta = 0$ は軌道の交差点ですれ違うことを意味し、 $\beta = 180$ は2つの軌道が最も離れた部分ですれ違うことを意味する。 $\beta$ が180度と360度の間の値の場合の特性は、180度と0度の間の場合の特性と同じで、各図の $(360 - \beta)$ 度の値を読み取ればよいことになる。図3のような衛星配置を用いる場合は、 $\alpha'$ は $\phi$ 付近の値をとることになる。評価に用いた軌道高度とそのときの衛星間隔 $\alpha'$ を表1に示す。

逆方向交差の場合には、相手の衛星が連続的に可視範囲内にあるわけではなく、交差する前後のある限られた時間内しか衛星間通信ができないので、前節で評価したパラメータ以外に相手の衛星の可視時間も評価する必要がある。また、同期運動する衛星間の場合には常に同じ衛星と通信を行なうことになり、特定の公転位相差についてのみ考慮すればよいが、逆方向交差の場合は順次可視範囲に入ってくる衛星を相手にして、回線切断および回線再接続を繰り返すことになる。したがって、相手の軌道内のある衛星との公転位相差を $\beta_0$ とすると、

$$\beta_n = \beta_0 + n\delta \quad (n = 0, 1, 2, \dots, s - 1) \quad (23)$$

を満たす全ての公転位相差 $\beta_n$ についてパラメータ評価を行ない、そのうちで最も厳しいものを満たすように、光衛星間通信端末を製作する必要がある。

図30には相手衛星と連続した通信が可能な可視時間を示す。低高度の場合は衛星の速度が速いうえに可視範囲 $\gamma_{max}$ が狭いため、可視時間は短い。図30の下側の図は、可視時間が30分以下の部分について拡大表示したものである。高度20000kmで $\beta$ がある一定値以下の場合には、実質的に軌道間隔 $\alpha = \pi - \alpha'$ の同期運動の場合と同じ状況になり、連続的な通信が可能になる。衛星間距離の最大・最小値、相対速度の視線方向成分の最大値、光行差補正角の最大値、方位角追尾範囲、方位角追尾速度の最大値、仰角追尾範囲、仰角追尾速度の最大値をそれぞれ図31から図37に示す。

前節と同様に軌道高度が700kmと10000kmの場合について、代表的な軌道間隔 $\alpha'$ に対して上記の全てのパラメータを評価した結果を図38～図53に示す。高度700kmで $\alpha'$ が60度の場合には、公転位相差が96度以上になると相手衛星が全く可視範囲内に入ってこなくなる。

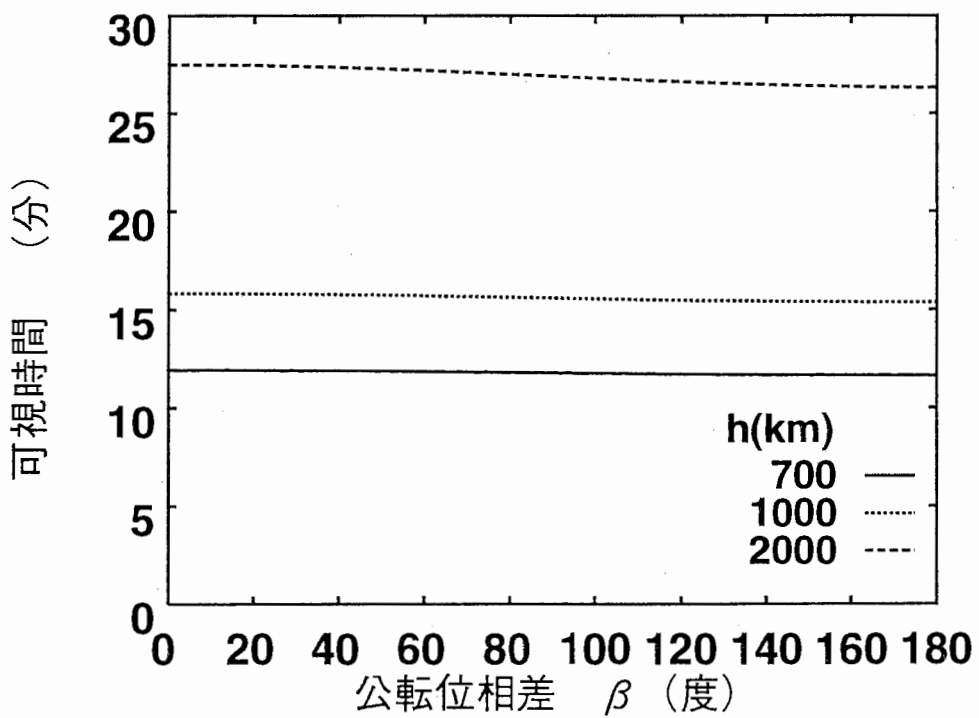
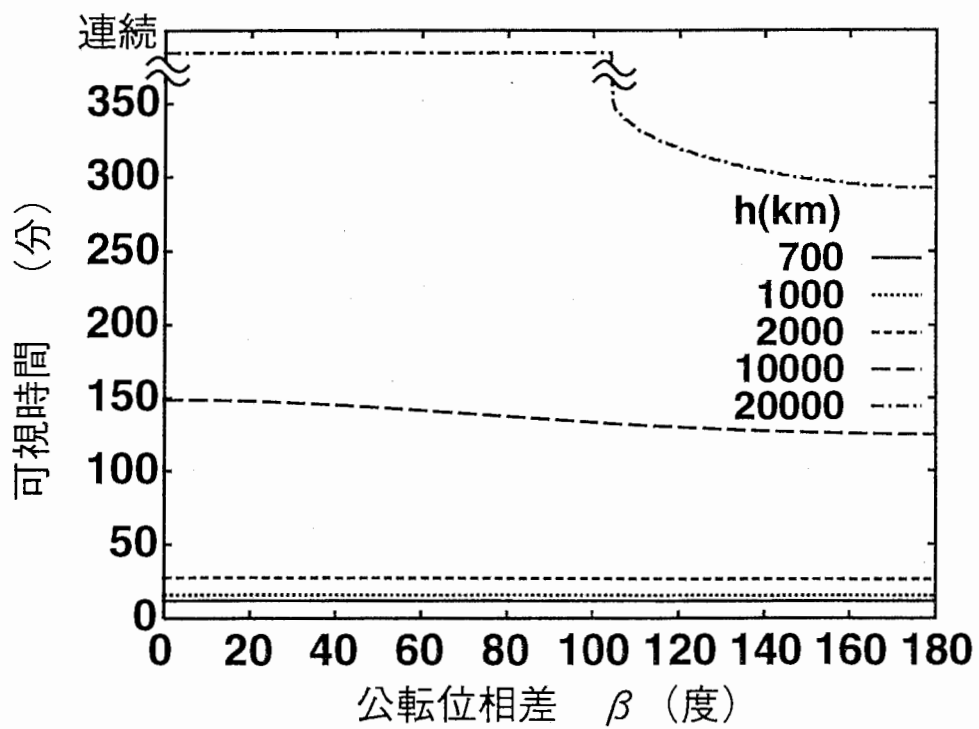


図 30: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星可視時間

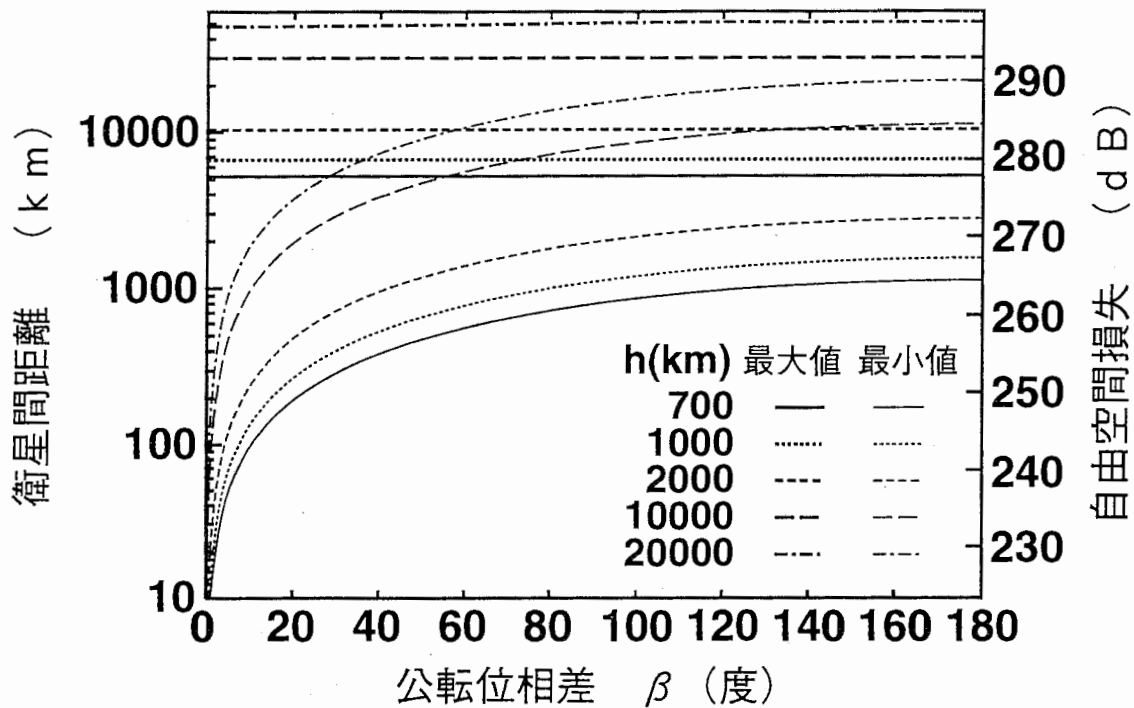


図 31: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離

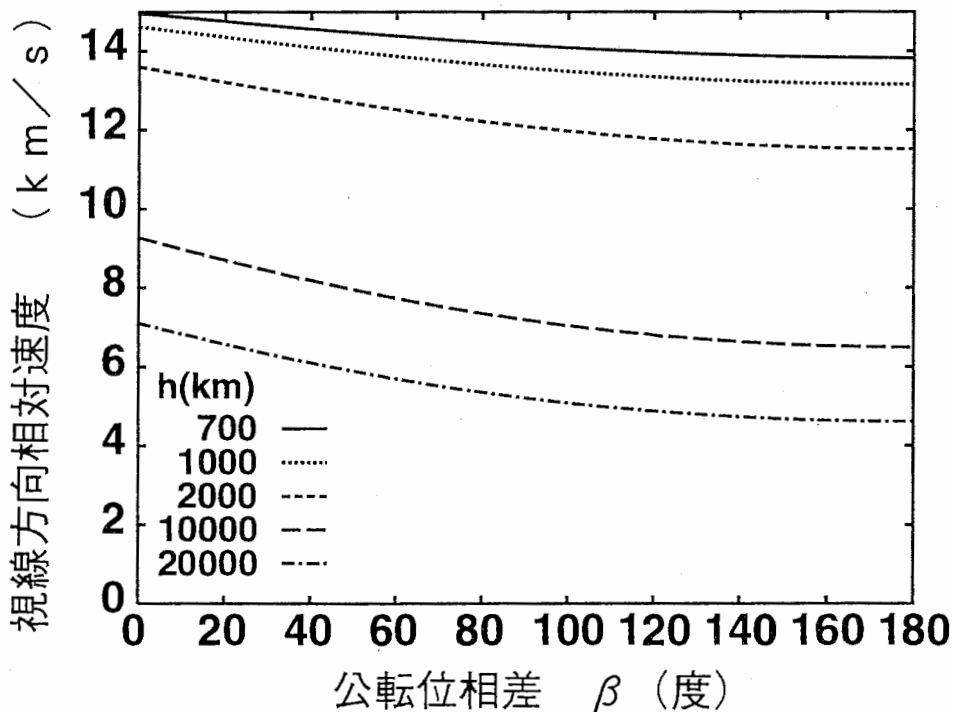


図 32: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度

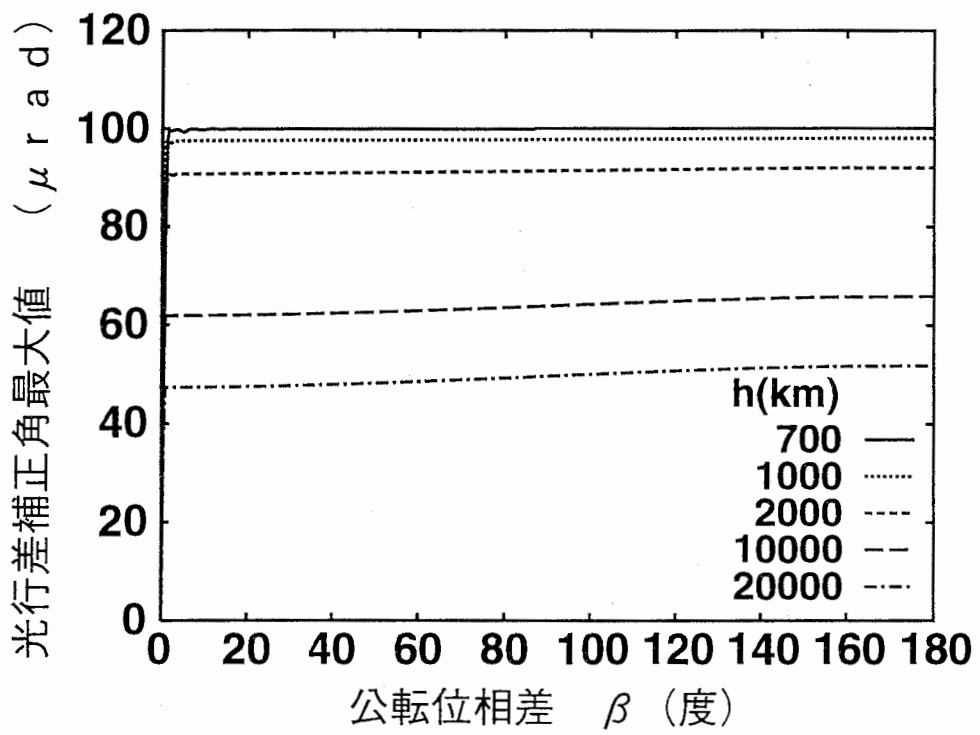


図 33: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角

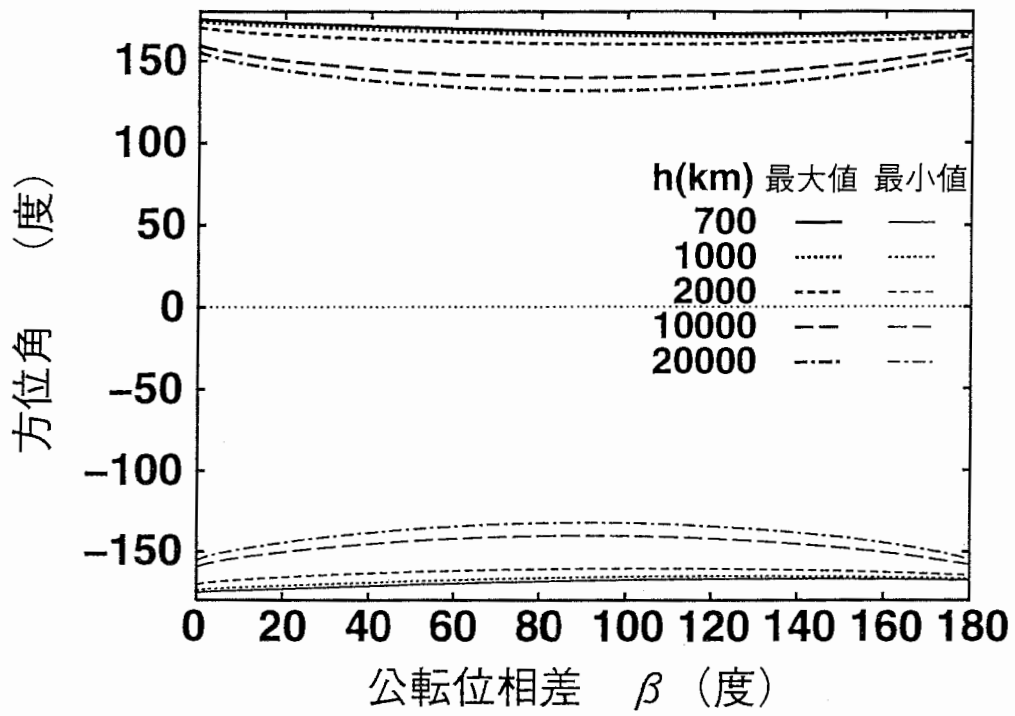


図 34: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲

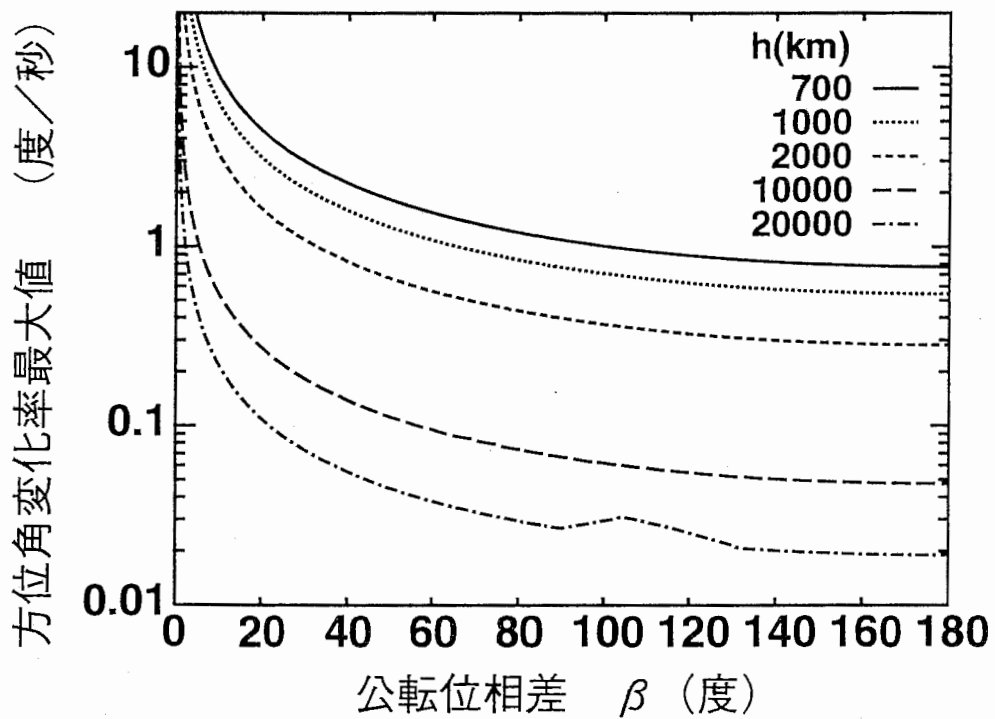


図 35: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度

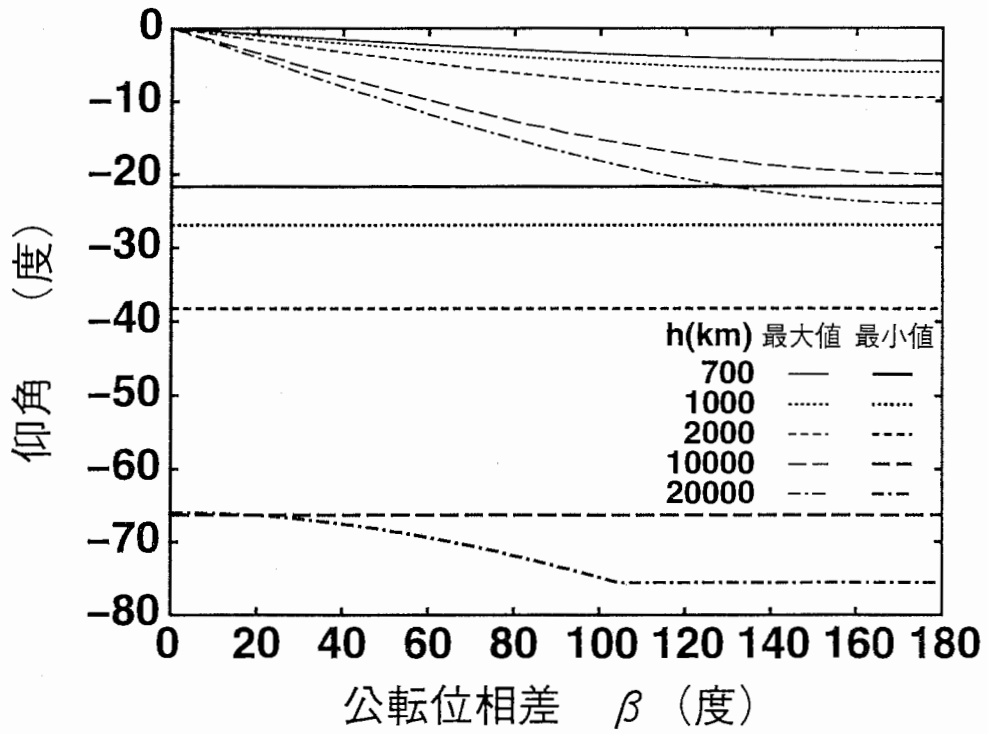


図 36: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲

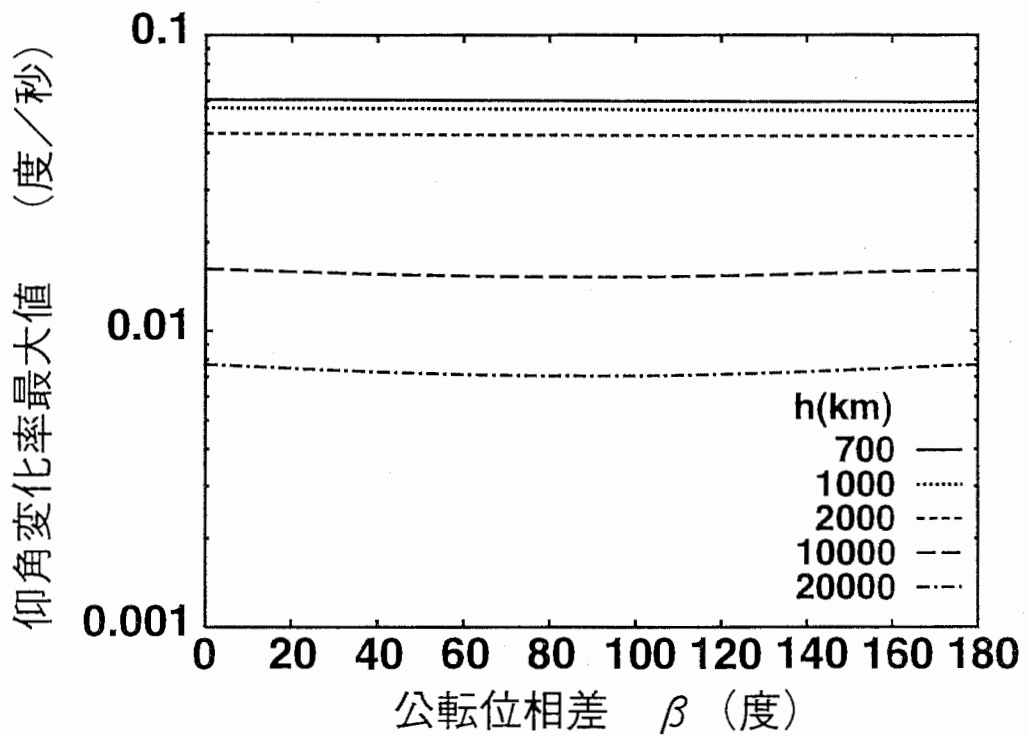


図 37: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度



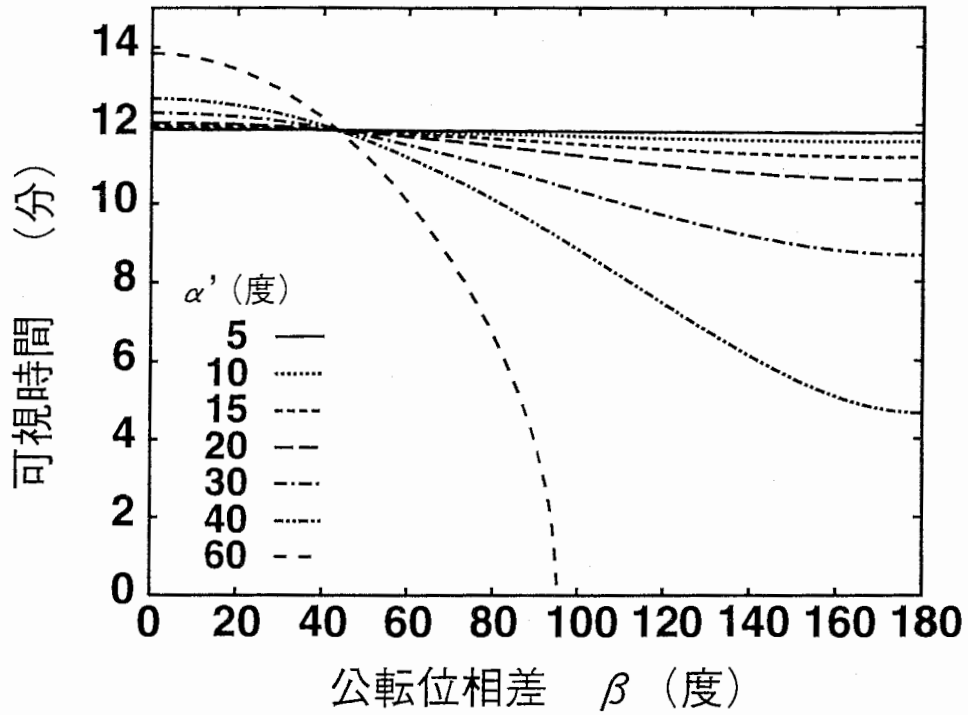


図 38: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星可視時間 ( $h=700\text{km}$ )

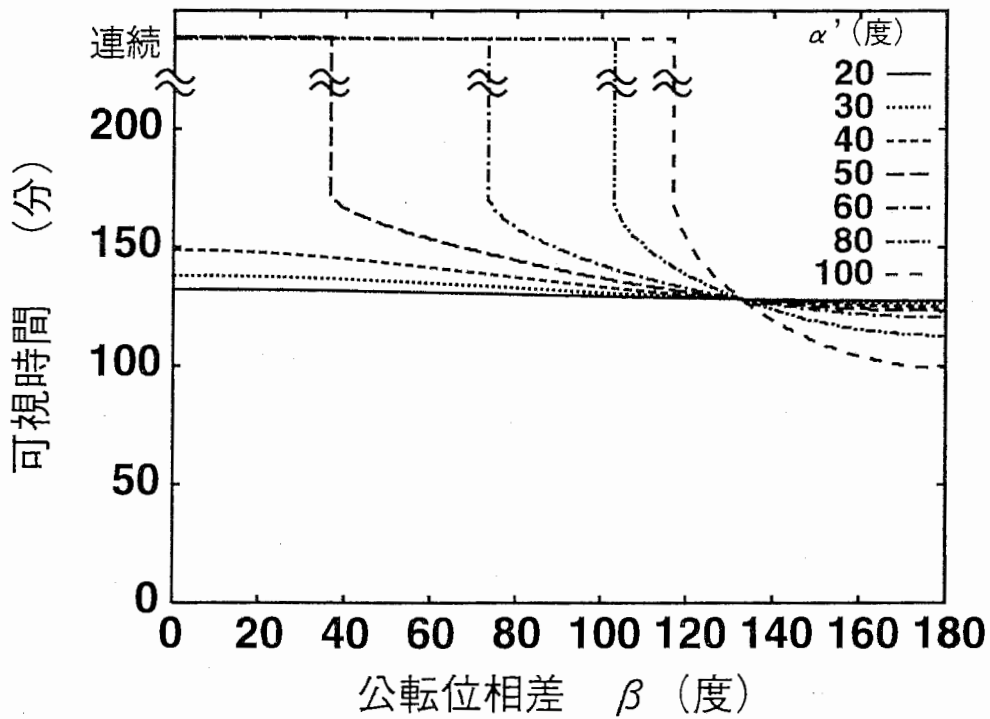


図 39: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星可視時間 ( $h=10000\text{km}$ )

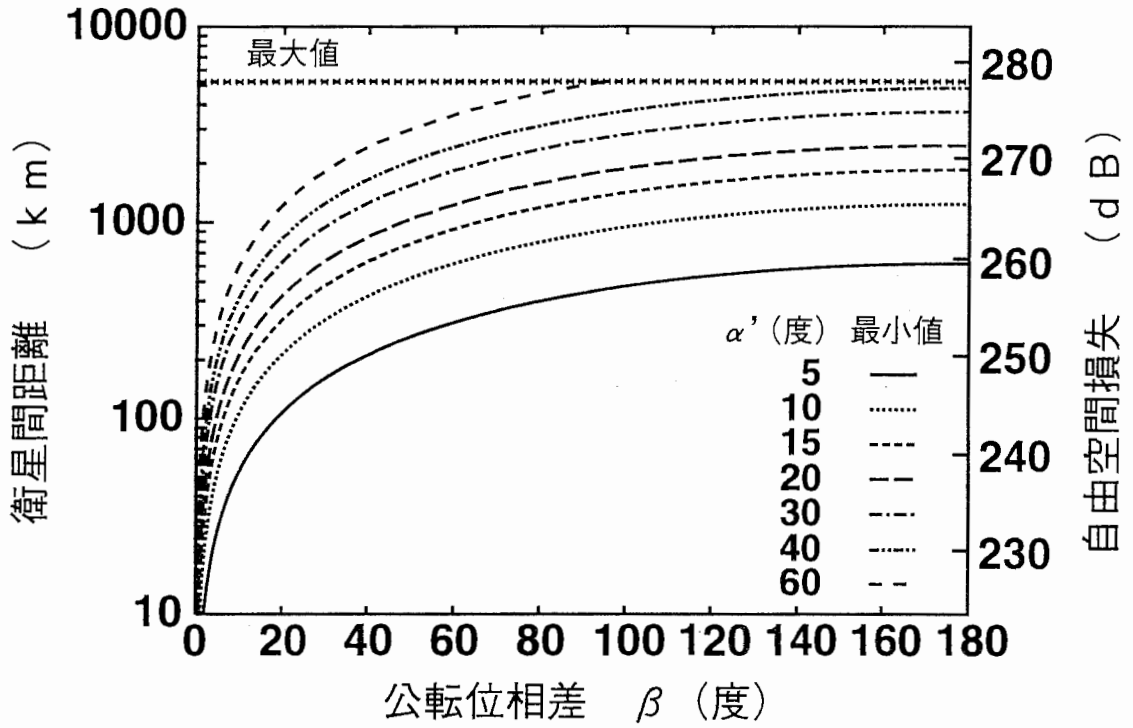


図 40: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離 ( $h=700\text{km}$ )

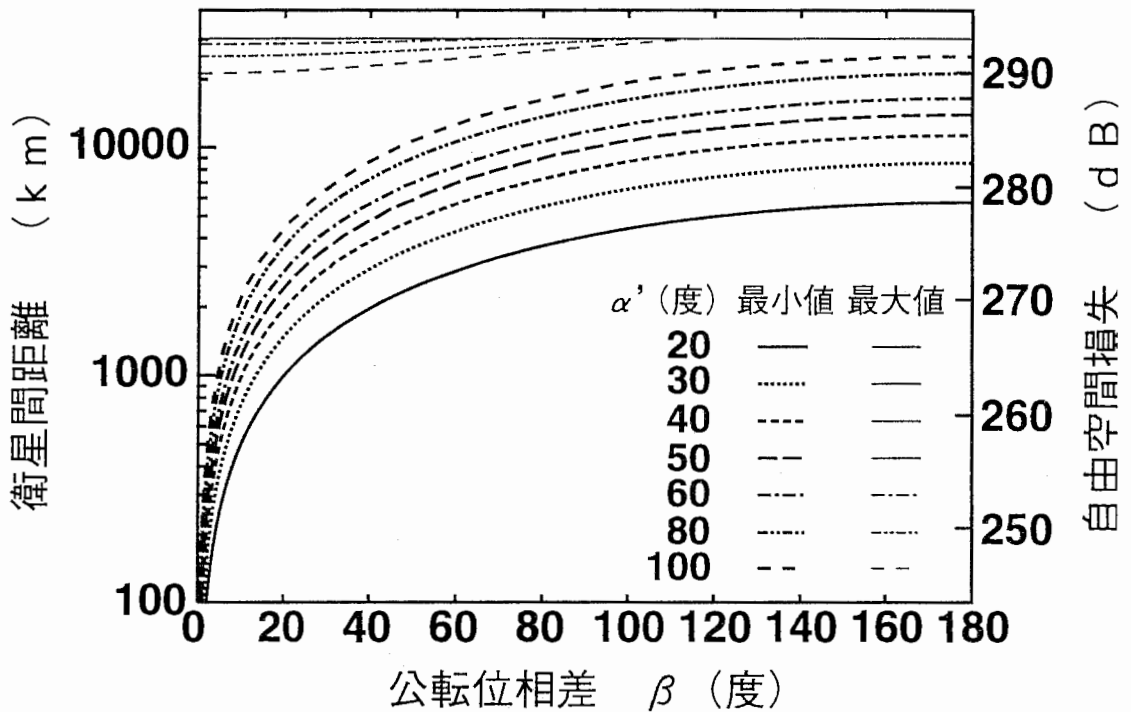


図 41: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における衛星間距離 ( $h=10000\text{km}$ )

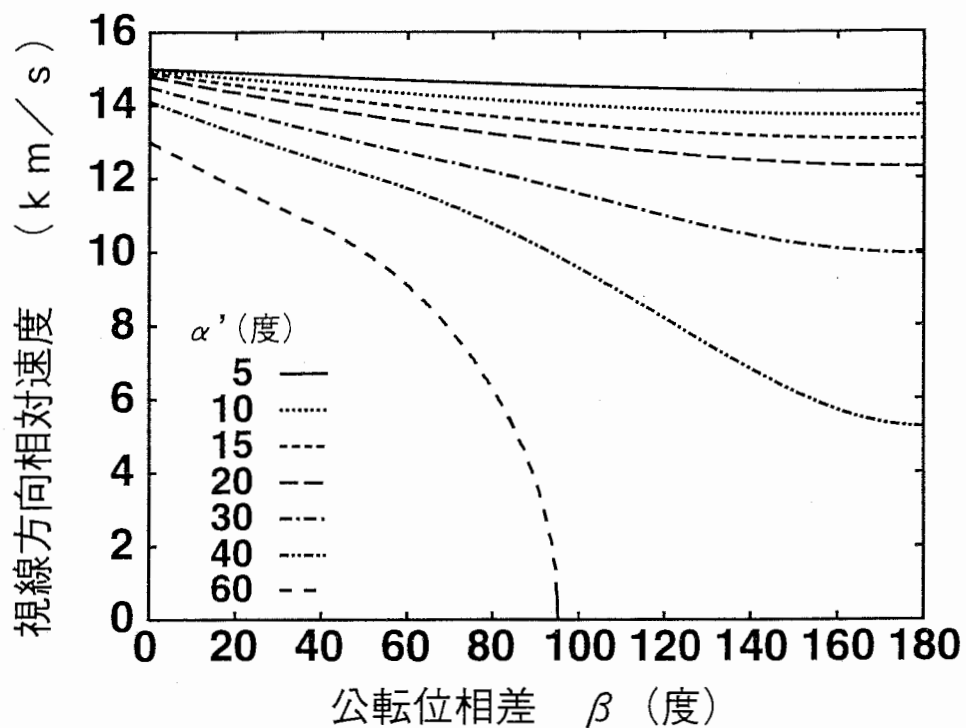


図 42: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度 ( $h=700\text{km}$ )

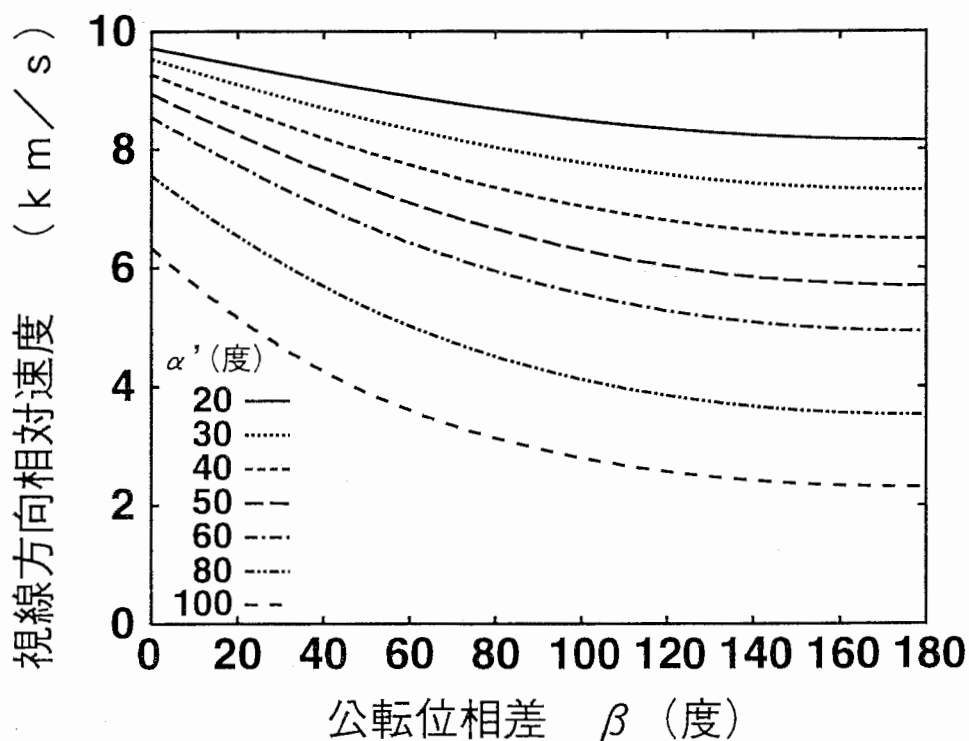


図 43: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における視線方向相対速度 ( $h=10000\text{km}$ )

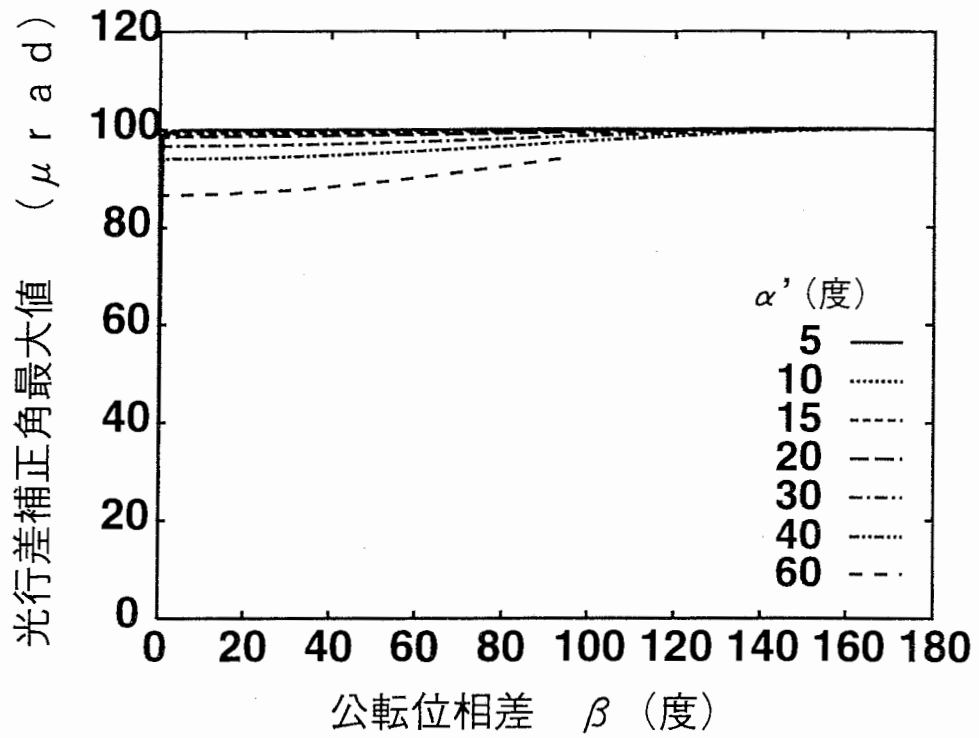


図 44: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角 ( $h=700\text{km}$ )

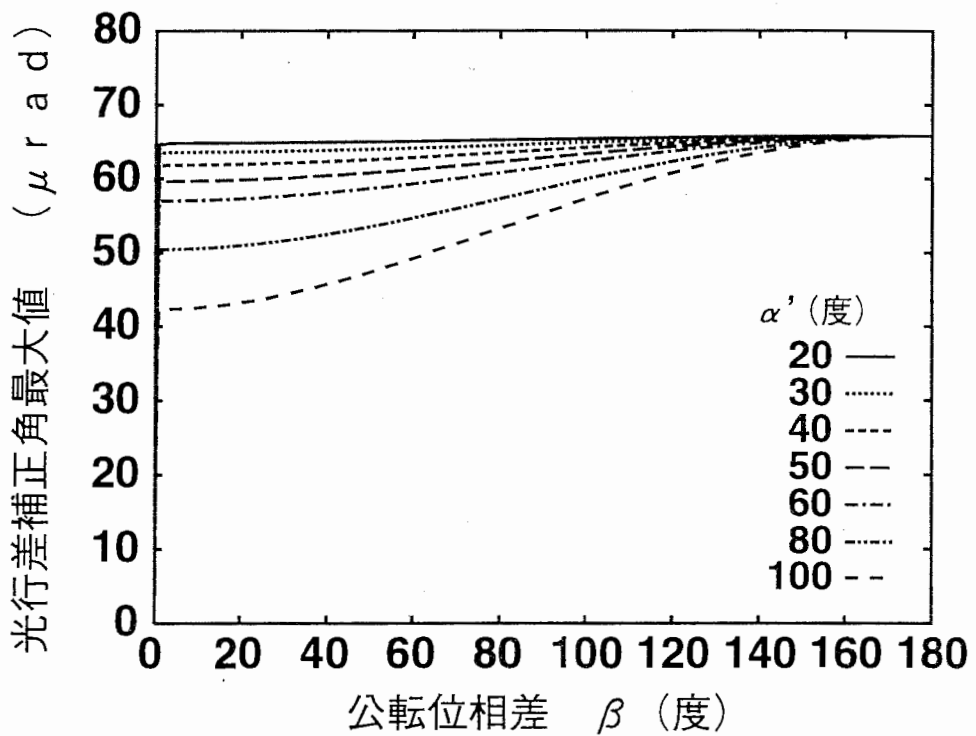


図 45: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における光行差補正角 ( $h=10000\text{km}$ )

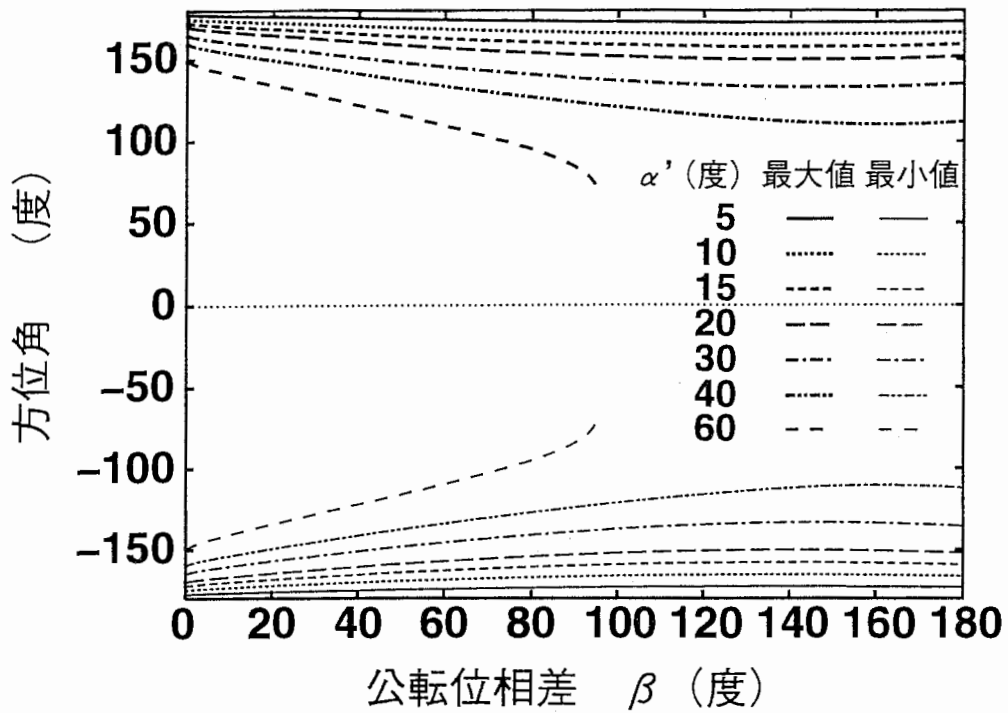


図 46: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲 ( $h=700\text{km}$ )

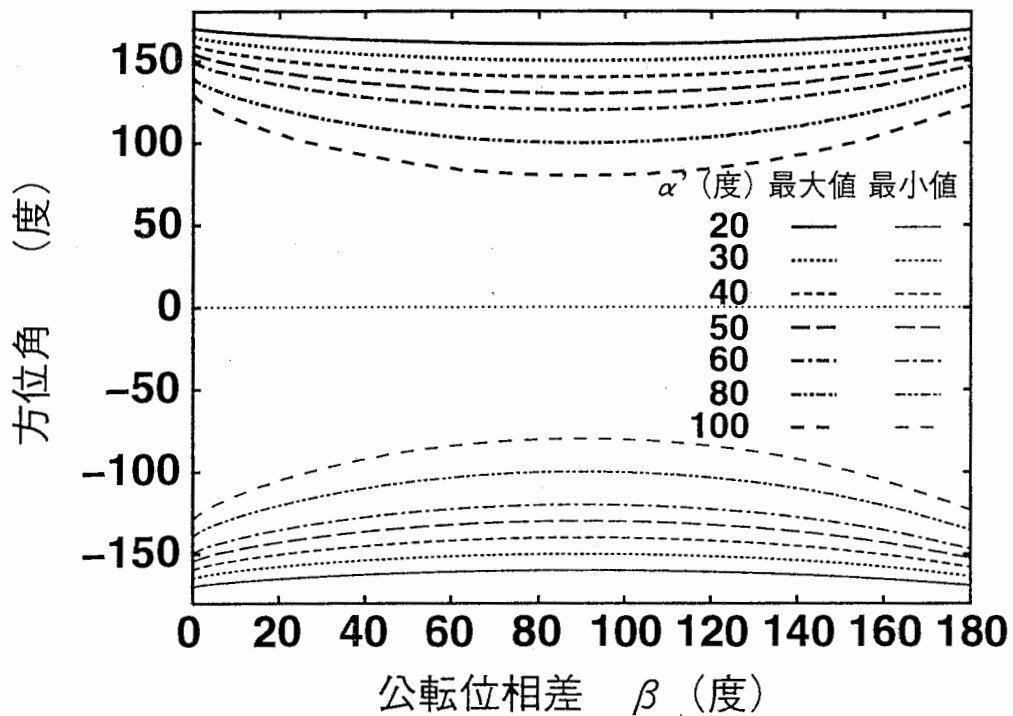


図 47: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾範囲 ( $h=10000\text{km}$ )

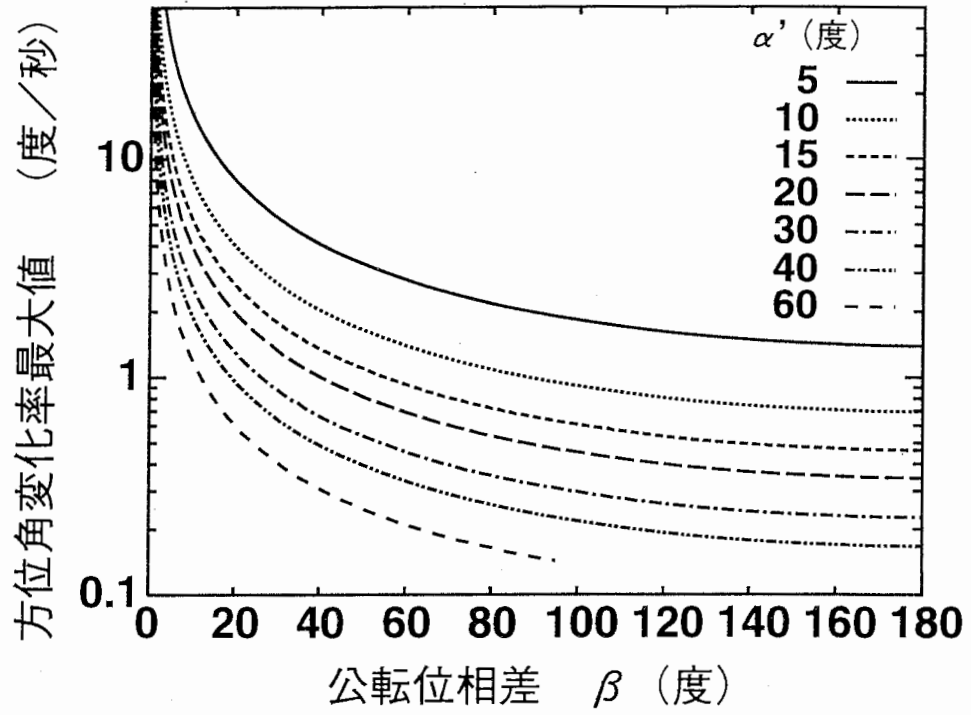


図 48: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度 ( $h=700\text{km}$ )

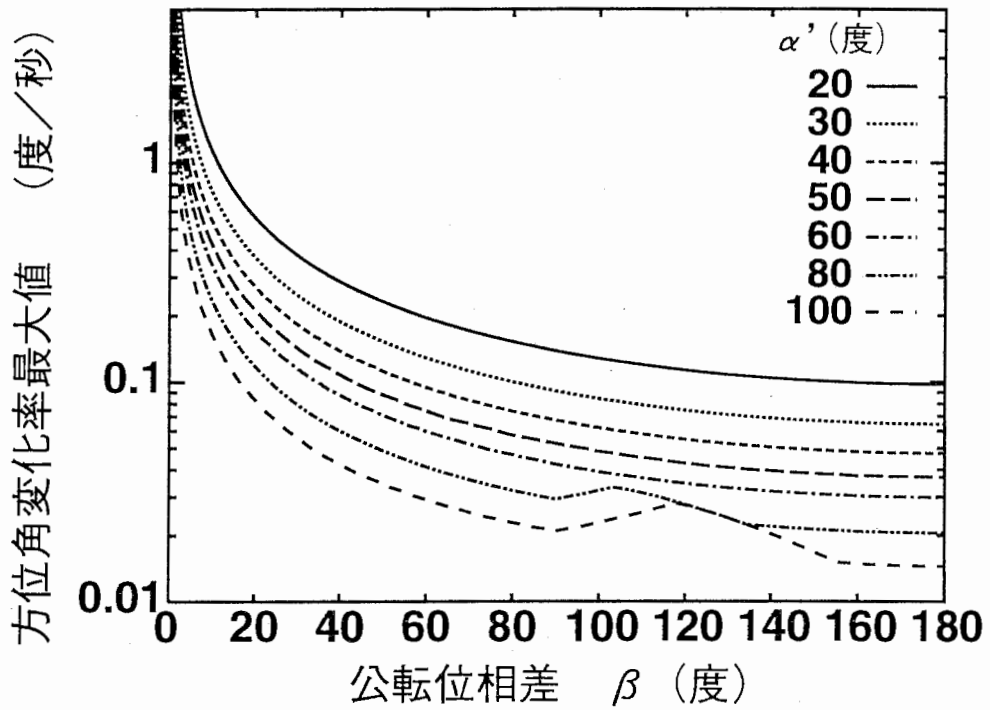


図 49: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における方位角追尾速度 ( $h=10000\text{km}$ )

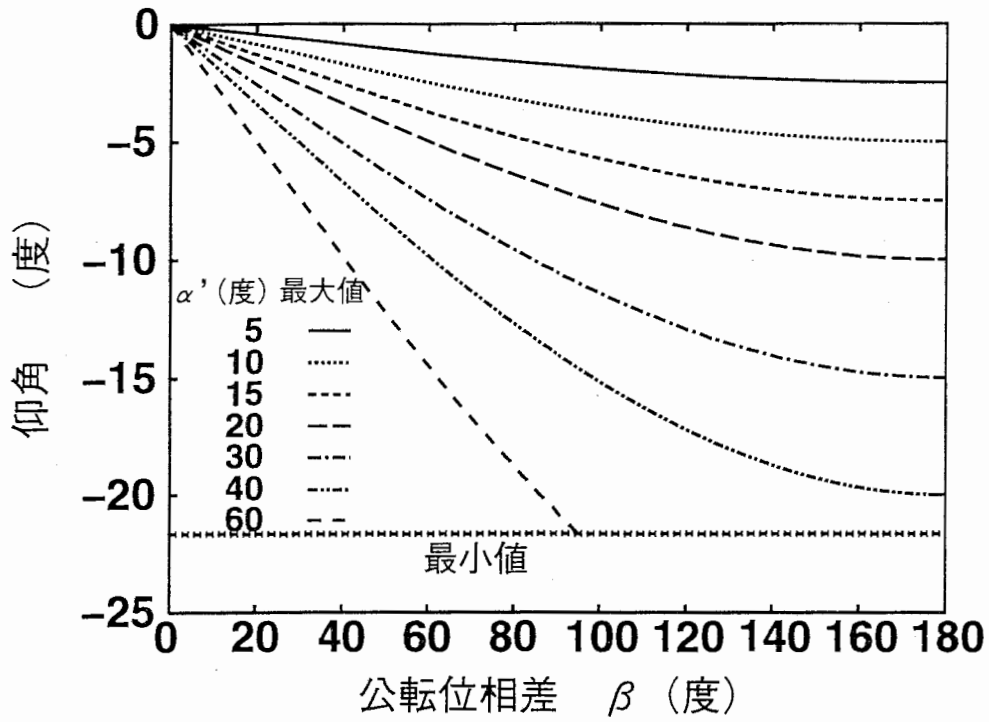


図 50: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲 ( $h=700\text{km}$ )

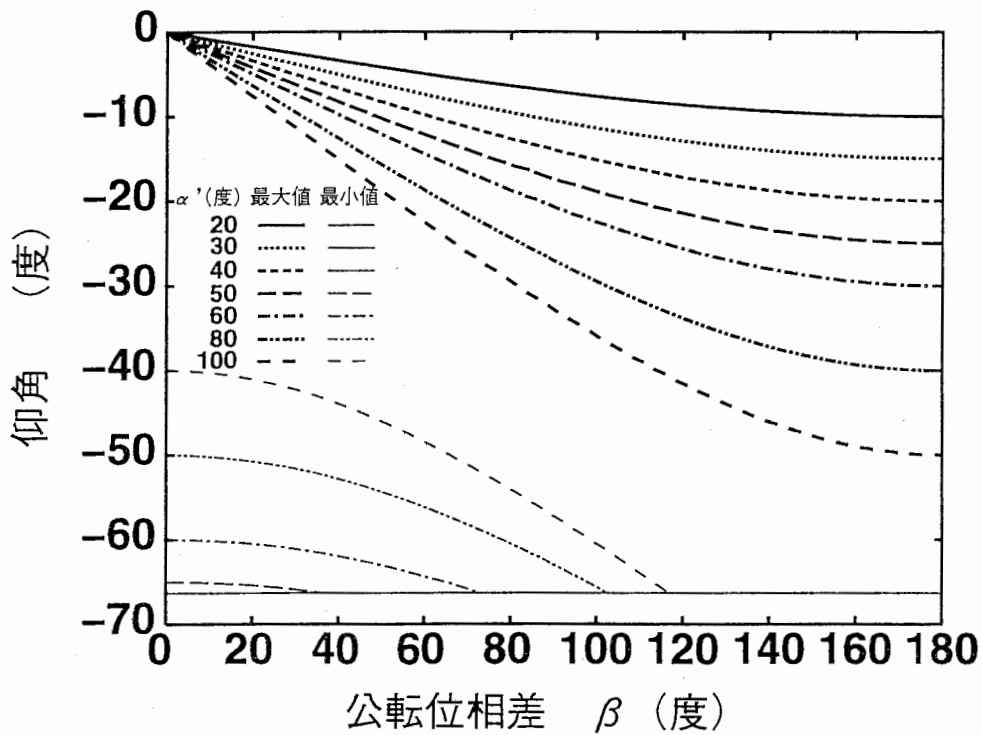


図 51: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾範囲 ( $h=10000\text{km}$ )

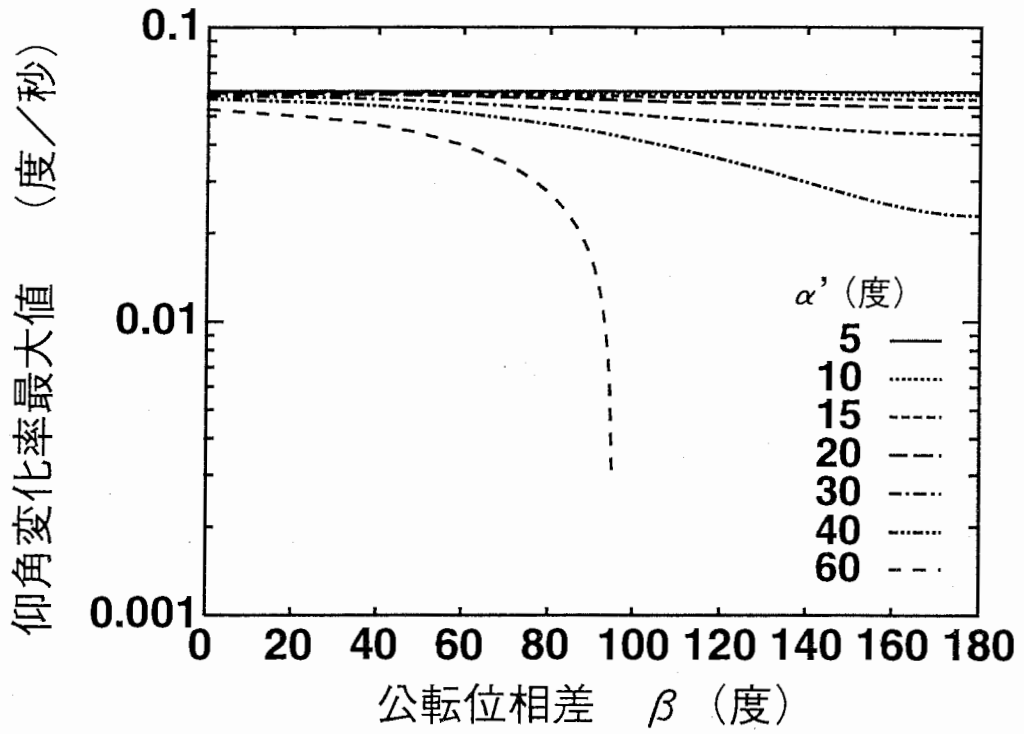


図 52: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度 ( $h=700\text{km}$ )

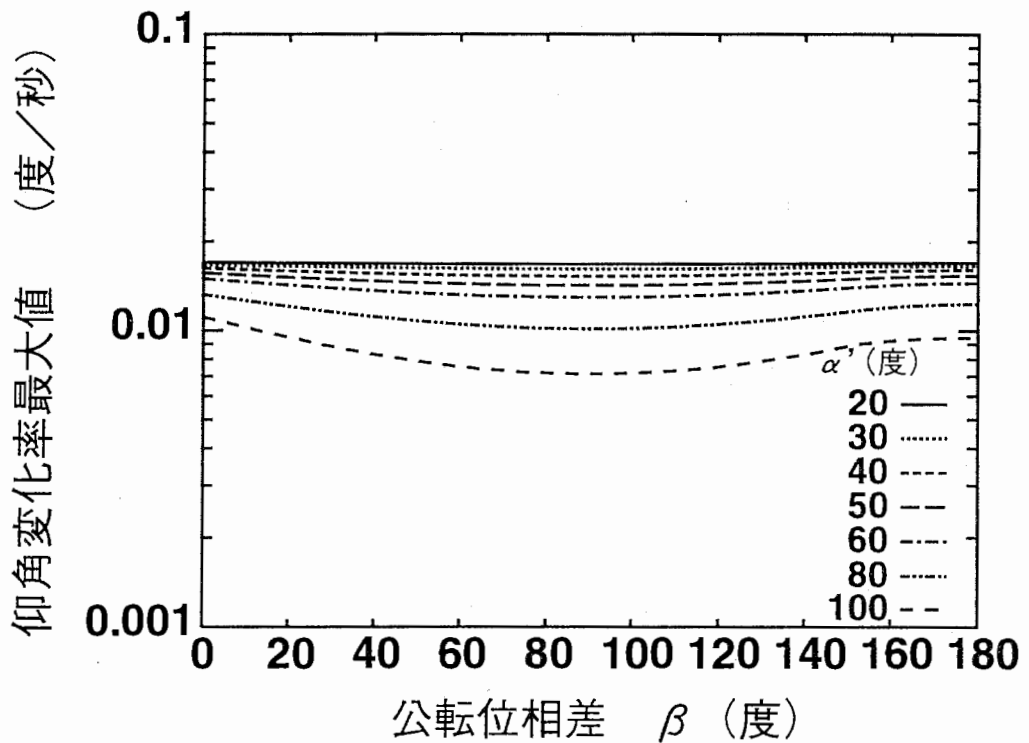


図 53: 逆方向交差する軌道面間の衛星間通信における仰角追尾速度 ( $h=10000\text{km}$ )



## 5. むすび

将来のLEOまたはMEOを用いたグローバル衛星通信ネットワークにおいて、光衛星間通信を利用する場合に考慮しなければならない各種のパラメータ、すなわち、衛星間通信における可視時間、衛星間距離、相対速度、光行差補正角、追尾範囲および追尾速度の評価を行なった。この評価の結果として、これらのパラメータと衛星高度との関係、およびLEOとMEOでよく使われる700kmと10000kmの高度に衛星群を配置した場合について、各種パラメータの衛星軌道間隔および軌道間の公転位相差に対する依存性を示した。光衛星間通信を搭載した衛星通信ネットワークを実現するためには、この評価結果に基づいて衛星間通信端末の各サブシステムに対する要求条件、例えば送信器の信号光出力、受信器の入力ダイナミックレンジ、捕捉追尾系の追尾範囲および追尾速度等を明らかにした上で、開発を進めていく必要がある。また、ボトルネックになる部分の負荷を軽減するために、本評価結果を参考にしながら、衛星高度や衛星配置方法、衛星間通信網の構成方法を検討することも可能である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導・ご助言頂いた、ATR光電波通信研究所の猪股英行社長、無線通信第一研究室唐沢好男室長、および光ISLグループの諸氏に感謝致します。

## 参考文献

- [1] R. J. Leopold, "Low-Earth Orbit Global Cellular Communications Network", *13th Aerospace Test Seminar*, pp.59-65, 1991.
- [2] H. C. Haugli, N. Hart and P. Poskett, "Inmarsat's Future Personal Communicator System", *Space Communications*, Vol.11, 2, pp.129-140, 1993.
- [3] R. J. Rusch, P. Cress, M. Horstein, R. Huang and E. Wiswell, "Odyssey, A Constellation for Personal Communications", *14th AIAA International Communication Satellite Systems Conference & Exhibit*, AIAA-92-2060, Washington, D.C., Mar. 1992.
- [4] R. A. Wiedeman, A. B. Salmasi and D. Rouffet, "GLOBALSTAR: Mobile Communications Where Ever You Are", *14th AIAA International Communication Satellite Systems Conference & Exhibit*, AIAA-92-1912-CP, pp.772-786, Washington, D.C., Mar. 1992.
- [5] E. F. Tuck, D. P. Patterson, J. R. Stuart and M. H. Lawrence, "The CALLING Network: A Global Wireless Communication System", *International Journal of Satellite Communications*, Vol.12, 1, pp.45-61, 1994.
- [6] J.M.Ruddy, et al, "Concept for a Cost/Technology-Driven Mobile Satellite Communications (MOBILSATCOM) System", *13th AIAA ICSSC*, AIAA-90-0864-cp, 1990.
- [7] 木村和宏, 稲垣恵三, 唐沢好男, "2層構成の衛星配置を用いた衛星通信ネットワーク", *信学技報*, SAT95-5, pp.59-66, Apr. 1995.
- [8] 木村和宏, 稲垣恵三, 唐沢好男, "傾斜軌道2層構成衛星配置を用いたグローバル通信ネットワーク", *信学技報*, SAT95-84, pp.73-78, Dec. 1995.
- [9] 藤瀬雅行, 上原清彦, 野原光夫, 中條渉, "低高度周回衛星間光通信を用いた広帯域移動体通信システムの検討", *信学技報*, OCS91-57, pp.37-44, Nov. 1991.
- [10] 大越孝敬, 菊池和朗, "コヒーレント光通信工学", オーム社, Jun. 1989.

## 付録：光衛星間通信パラメータ評価プログラム

本レポートで報告したパラメータ評価を行なうために使用した FORTRAN プログラムのソースリストを添付する。本プログラム実行時に、以下のパラメータを順番に入力する。

- 衛星高度 (km)
- パラメータを計算する時間刻み (秒)
- 軌道間隔 (度) (但し逆方向交差の場合は  $180 - \alpha'$  を与える)
- 公転位相差 開始値, 終了値, 刻み (度)
- 計算結果出力ファイル名

計算結果として、以下のパラメータが各行に順に出力される。

- 公転位相差 (度)
- 相手衛星可視時間の最小値 (分)
- 衛星間距離 最小値, 最大値 (km)
- 視線方向相対速度 最小値, 最大値 (km/s)
- 光行差補正角 最小値, 最大値 ( $\mu$  rad)
- 方位角 最小値, 最大値 仰角 最小値, 最大値 (度) (アジマス軸 軌道法線方向)
- 方位角変化率 最小値, 最大値 仰角変化率 最小値, 最大値 (度) (アジマス軸 軌道法線方向)
- 方位角 最小値, 最大値 仰角 最小値, 最大値 (度) (アジマス軸 反地球方向)
- 方位角変化率 最小値, 最大値 仰角変化率 最小値, 最大値 (度) (アジマス軸 反地球方向)

なお、本プログラムでは速度や変化率に関するパラメータを解析的には計算せず、時間刻みの  $1/100$  だけ時刻をずらしたときの位置・角度と、元の時刻の位置・角度の差に基づいて求めている。このため、変化率が非常に大きくなる  $\beta = 0$  の近傍では正しい値が得られない。但し、 $\beta = 0.01$  度程度であれば、時間刻みを小さくすることによって回避できる。

次に、本プログラムを構成する各ルーチンの機能および処理内容について説明する。

- main program parisl

メインプログラムでは、パラメータ入力、設定の後、評価したい各公転位相差毎に'do 20'のループで計算する。このループの最初で評価パラメータの初期化をした後、'do 10'のループで時刻刻み毎に評価パラメータを計算する。このループでは、両方の衛星の位置、相手衛星の方向を計算し、2種類の方位角・仰角(アジマス軸が軌道面法線方向および反地球方向)を求める。衛星が可視範囲内であれば、微小時刻後の位置、方位角、仰角等を計算し、相対速度、光行差補正角、方位角・仰角変化率を求め、全てのパラメータについてこれまでの最大・最小値と比較して更新する。可視範囲から外れれば、連続可視時間を計算するためのデータを保存する。軌道1周期分の計算後結果をファイルに出力し、次の公転位相差について計算する。

- subroutine rpara

入力パラメータを読み込み、両方の衛星の軌道要素(sma: 軌道半径、anode: 昇交点経度、ma: 緯度引数)を設定する。sma1等は評価対象の光衛星間通信端末をもつ側の衛星の軌道要素、sma0等は相手側の中継衛星の軌道要素である。この他、可視条件判定のための最低仰角 minel、時刻、公転位相差等の範囲や刻み幅などを設定する。

- subroutine angvel

両方の衛星の公転角速度を計算する。

- subroutine clear0

評価パラメータの初期値(最小値 9.9d19、最大値 -9.9d19)を設定する。

- subroutine cleara

方位角保存値を初期化する。

- subroutine usrxyz

評価対象の衛星の軌道要素と時刻から、3次元直交座標系における位置と緯度・経度を計算する。

- subroutine satxyz

中継衛星の軌道要素と時刻から、3次元直交座標系における位置を計算する。

- subroutine dircos

両方の衛星の位置に基づいて、中継衛星の方向余弦と距離を計算する。

- subroutine dircnv

評価対象衛星の緯度経度と相手衛星の方向余弦から、その衛星固定の座標系 (x: 衛星運動方向, y: 反地球方向, z: 軌道面法線方向) における方向余弦を求める。

- subroutine azel

衛星固定の座標系における相手衛星の方向余弦から、方位角・仰角を求める。

- subroutine velo

ある時刻における衛星の位置と、微小時間経過後の衛星の位置とから、衛星の速度を求める。

- subroutine poa

両方の衛星の速度と、相手衛星の方向余弦とから、光行差補正角を求める。

- subroutine eval

視線方向相対速度  $rr$ 、方位角・仰角変化率  $daz, del, dazg, delg$  を求める。角度をラジアンから度に変換する。方位角の不確定性除去の処理を行なう。ある時刻から衛星が可視範囲に入った場合には、その時刻を保存する。全ての評価パラメータについて、その時刻までの最大・最小値と比較し、更新する。

- subroutine output

軌道1周回の間で可視範囲に入った回数とその連続可視時間を計算し、その中の最小値を求める。その後、全てのパラメータについて画面出力およびファイル出力処理を行なう。

## プログラムソースリスト

```
*****
*
*   Optical ISL parameter evaluation program   *
*   Programmed by K.Kimura      Dec.1995      *
*   (c) ATR Optical and Radio Comm. Res. Labs. *
*
*****

      program paris1

      real*8      sma1,anode1,ma1
      real*8      sma0,anode0,ma0,ma0s,ma0e,ma0stp
      real*8      t,td,tsta,tend,tstep,tdif
      real*8      omega0,omega1
      real*8      x1,y1,z1,x0,y0,z0,x1d,y1d,z1d,x0d,y0d,z0d
      real*8      vx1,vy1,vz1,vx0,vy0,vz0
      real*8      theta,phi,pa
      real*8      cx,cy,cz,range
      real*8      x,y,z,az,el,xx,yy,zz,azgeo,elgeo
      real*8      xd,yd,zd,azd,eld, added,cyd,czd,azgeod,elgeod,ranged
      real*8      minel
      real*8      tb(20),res(22),azo(2)
      integer*4   i,j,nma,nstep,nt,tflg
      character*10 fname

      call rpara(minel,sma1,anode1,ma1,sma0,anode0,ma0s,ma0e,
&      ma0stp,nma,tsta,tend,tstep,nstep,fname)
      tdif=tstep*0.01d0
      open(10,file=fname)
      call angvel(sma0,omega0,sma1,omega1)
      do 20 j=0,nma
         ma0=ma0s+ma0stp*dble(j)+1.0d-10
         nt=0
         tflg=0
         call clear0(res)
         call cleara(azo)
         do 10 i=0,nstep
            t=tsta+tstep*dble(i)
            call usrxyz(sma1,anode1,ma1,omega1,t,x1,y1,z1,theta,phi)
            call satxyz(sma0,anode0,ma0,omega0,t,x0,y0,z0)
            call dircos(x1,y1,z1,x0,y0,z0,cx,cy,cz,range)
            call dircnv(theta,phi,cx,cy,cz,x,y,z)
            call azel(x,y,z,az,el)
               xx=x
               yy=-z
               zz=y
         enddo
      enddo
```

```

call azel(xx,yy,zz,azgeo,elgeo)
if (elgeo.ge.minel) then
  td=t+tdif
  call usxyz(sma1,anode1,ma1,omega1,td,x1d,y1d,z1d,
&          theta,phi)
  call satxyz(sma0,anode0,ma0,omega0,td,
&          x0d,y0d,z0d)
  call dircos(x1d,y1d,z1d,x0d,y0d,z0d,cxd,cyd,czd,ranged)
  call dircnv(theta,phi,cxd,cyd,czd,xd,yd,zd)
  call azel(xd,yd,zd,azd,eld)
  xx=xd
  yy=-zd
  zz=yd
  call azel(xx,yy,zz,azgeod,elgeod)
  call velo(x0,y0,z0,x0d,y0d,z0d,tdif,vx0,vy0,vz0)
  call velo(x1,y1,z1,x1d,y1d,z1d,tdif,vx1,vy1,vz1)
  call poa(cx,cy,cz,vx0,vy0,vz0,vx1,vy1,vz1,pa)
  call eval(t,range,ranged,az,el,azd,eld,tdif,azgeo,
&          elgeo,azgeod,elgeod,pa,tflg,nt,tb,res,azo)
  elseif (tflg.eq.1) then
    tflg=0
    nt=nt+1
    tb(nt)=t
    call cleara(azo)
  endif
10  continue
  call output(ma0,t,tflg,nt,tb,res)
20  continue
close(10)
stop
end

```

```

subroutine rpara(minel,sma1,anode1,ma1,sma0,anode0,ma0s,ma0e,
&          ma0stp,nma,tsta,tend,tstep,nstep,fname)
real*8    minel,sma1,anode1,ma1
real*8    sma0,anode0,ma0s,ma0e,ma0stp,tsta,tend,tstep
integer*4  nma,nstep
character*10 fname

```

```

real*8    pi,degrad,gm,hd,re
real*8    h,omega
data      pi/3.1415926535897932d0/,gm/398600.63d0/
data      hd/200.0d0/,re/6378.14/

```

```

degrad=pi/180.0d0
read(5,*) h
read(5,*) tstep
read(5,*) anode0

```

```

read(5,*) ma0s,ma0e,ma0stp
read(5,'(a)') fname
sma1=re+h
anode1=0.0d0
ma1=0.0d0
minel=-acos((re+hd)/sma1)
omega=sqrt(gm/sma1**3)
tsta=0.0d0
tend=2.0d0*pi/omega
nstep=int(tend/tstep)+1
tend=tstep*dble(nstep)
sma0=sma1
anode0=anode0*degrad
ma0s=ma0s*degrad
ma0e=ma0e*degrad
ma0stp=ma0stp*degrad
nma=nint((ma0e-ma0s)/ma0stp)
return
end

```

```

subroutine angvel(sma0,omega0,sma1,omega1)
real*8      sma0,omega0,sma1,omega1

real*8      gm
data        gm/398600.63d0/

omega0=sqrt(gm/sma0**3)
omega1=sqrt(gm/sma1**3)
return
end

```

```

subroutine clear0(res)
real*8      res(22)

integer*4   i,j

do 10 i=1,11
  j=i*2-1
  res(j)=9.9d19
  j=i*2
  res(j)=-9.9d19
10 continue
return
end

```



```

subroutine cleara(azo)
real*8      azo(2)

azo(1)=0.0d0
azo(2)=0.0d0
return
end

```

```

subroutine usrxyz(sma,anode,ma,omega,t,x,y,z,theta,phi)
real*8      sma,anode,ma,omega,t,x,y,z,theta,phi

theta=anode
phi=ma+omega*t
x=sma*cos(phi)*cos(anode)
y=sma*cos(phi)*sin(anode)
z=sma*sin(phi)
return
end

```

```

subroutine satxyz(sma,anode,ma,omega,t,x,y,z)
real*8      sma,anode,ma,omega,t,x,y,z

real*8      ph

ph=ma+omega*t
x=sma*cos(ph)*cos(anode)
y=sma*cos(ph)*sin(anode)
z=sma*sin(ph)
return
end

```

```

subroutine dircos(xg,yg,zg,x0,y0,z0,cx,cy,cz,range)
real*8      xg,yg,zg,x0,y0,z0,cx,cy,cz,range

cx=x0-xg
cy=y0-yg
cz=z0-zg
range=sqrt(cx*cx+cy*cy+cz*cz)
cx=cx/range
cy=cy/range
cz=cz/range
return
end

```

```
subroutine dircnv(theta,phi,cx,cy,cz,x,y,z)
real*8      theta,phi,cx,cy,cz,x,y,z
```

```
real*8      ct,st,cp,sp
```

```
ct=cos(theta)
st=sin(theta)
cp=cos(phi)
sp=sin(phi)
x=-sp*ct*cx-sp*st*cy+cp*cz
z=st*cx-ct*cy
y=cp*ct*cx+cp*st*cy+sp*cz
return
end
```

```
subroutine azel(x,y,z,az,el)
real*8      x,y,z,az,el
```

```
real*8      pi
data       pi/3.1415926535897932d0/
```

```
el=asin(z)
if (abs(x).lt.1.0d-12) then
  if (y.gt.0.0d0) then
    az=pi/2.0d0
  else
    az=-pi/2.0d0
  endif
else
  az=atan(y/x)
  if (x.lt.0.0d0) then
    if (y.gt.0.0d0) then
      az=az+pi
    else
      az=az-pi
    endif
  endif
endif
return
end
```

```
subroutine velo(x,y,z,xd,yd,zd,tdif,vx,vy,vz)
real*8      x,y,z,xd,yd,zd,tdif,vx,vy,vz
```

```

vx=(xd-x)/tdif
vy=(yd-y)/tdif
vz=(zd-z)/tdif
return
end

```

```

subroutine poa(cx,cy,cz,vx0,vy0,vz0,vx1,vy1,vz1,pa)
real*8      cx,cy,cz,vx0,vy0,vz0,vx1,vy1,vz1,pa

```

```

real*8      c
real*8      cvx,cvy,cvz,v
real*8      dprd,vt,sqsin
data        c/299792.458d0/

```

```

call dircos(vx1,vy1,vz1,vx0,vy0,vz0,cvx,cvy,cvz,v)
dprd=cx*cvx+cy*cvy+cz*cvz
sqsin=1.0d0-dprd*dprd
if (sqsin.lt.0.0d0) then
    sqsin=0.0d0
endif
vt=v*sqrt(sqsin)
pa=2.0d0*atan(vt/c)
return
end

```

```

subroutine eval(t,range,ranged,az,el,azd,eld,tdif,
&              azgeo,elgeo,azgeod,elgeod,pa,tflg,nt,tb,res,azo)

```

```

integer*4    tflg,nt
real*8       t,range,ranged,az,el,azd,eld,tdif
real*8       azgeo,elgeo,azgeod,elgeod,pa,tb(*),res(*),azo(*)

```

```

real*8       daz,del,dazg,delg,rr,poa
real*8       azu,azl
real*8       pi,degrad
data        pi/3.1415926535897932d0/

```

```

degrad=180.0d0/pi
rr=(ranged-range)/tdif
daz=(azd-az)*degrad/tdif
del=(eld-el)*degrad/tdif
dazg=(azgeod-azgeo)*degrad/tdif
delg=(elgeod-elgeo)*degrad/tdif
azgeo=azgeo*degrad
elgeo=elgeo*degrad
az=az*degrad

```

```

el=el*degrad
azl=azo(1)-180.0d0
azu=azo(1)+180.0d0
if (az.gt.azu) then
    az=az-360.0d0
elseif (az.lt.azl) then
    az=az+360.0d0
endif
azo(1)=az
azl=azo(2)-180.0d0
azu=azo(2)+180.0d0
if (azgeo.gt.azu) then
    azgeo=azgeo-360.0d0
elseif (azgeo.lt.azl) then
    azgeo=azgeo+360.0d0
endif
azo(2)=azgeo
poa=pa*1.0d6
if (tflg.eq.0) then
    tflg=1
    nt=nt+1
    tb(nt)=t
endif
if (range.lt.res(1)) then
    res(1)=range
endif
if (range.gt.res(2)) then
    res(2)=range
endif
if (rr.lt.res(3)) then
    res(3)=rr
endif
if (rr.gt.res(4)) then
    res(4)=rr
endif
if (poa.lt.res(5)) then
    res(5)=poa
endif
if (poa.gt.res(6)) then
    res(6)=poa
endif
if (az.lt.res(7)) then
    res(7)=az
endif
if (az.gt.res(8)) then
    res(8)=az
endif
if (el.lt.res(9)) then
    res(9)=el
endif

```

```

if (el.gt.res(10)) then
  res(10)=el
endif
if (abs(daz).lt.res(11)) then
  res(11)=abs(daz)
endif
if (abs(daz).gt.res(12)) then
  res(12)=abs(daz)
endif
if (abs(del).lt.res(13)) then
  res(13)=abs(del)
endif
if (abs(del).gt.res(14)) then
  res(14)=abs(del)
endif
if (azgeo.lt.res(15)) then
  res(15)=azgeo
endif
if (azgeo.gt.res(16)) then
  res(16)=azgeo
endif
if (elgeo.lt.res(17)) then
  res(17)=elgeo
endif
if (elgeo.gt.res(18)) then
  res(18)=elgeo
endif
if (abs(dazg).lt.res(19)) then
  res(19)=abs(dazg)
endif
if (abs(dazg).gt.res(20)) then
  res(20)=abs(dazg)
endif
if (abs(delg).lt.res(21)) then
  res(21)=abs(delg)
endif
if (abs(delg).gt.res(22)) then
  res(22)=abs(delg)
endif
return
end

```

```

subroutine output(ma0,t,tflg,nt,tb,res)
real*8      ma0,t,tb(*),res(*)
integer*4   tflg,nt

integer*4   hnt,i
real*8      vdur,dma0

```

```

real*8      durmin
real*8      pi,degrad
data        pi/3.1415926535897932d0/

degrad=180.0d0/pi
durmin=9.9d19
dma0=ma0*degrad
if (tflg.eq.1) then
  nt=nt+1
  tb(nt)=t
  if (tb(1).eq.0.0d0) then
    if (nt.eq.2) then
      tb(2)=t*1.2d0
    else
      tb(1)=tb(nt-1)-tb(nt)
      nt=nt-2
    endif
  endif
endif
if (nt.eq.0) then
  vdur=0.0d0
  write(10,'(f6.1,f10.4)') dma0,vdur
  write(6,'(1x,f6.1,f10.4)') dma0,vdur
else
  hnt=nt/2
  do 10 i=1,hnt
    vdur=tb(i*2)-tb(i*2-1)
    if (vdur.lt.durmin) then
      durmin=vdur
    endif
10  continue
  vdur=durmin/60.0d0
  write(10,'(f6.1,f10.3,2f11.2,8f10.4,4e12.4,4f10.4,4e12.4)')
&      dma0,vdur,(res(i),i=1,22)
  write(6,'(1x,f6.1,f10.3,2f11.2,8f10.4,4e12.4,4f10.4,4e12.4)')
&      dma0,vdur,(res(i),i=1,22)
endif
return
end

```