

衛星通信・放送における 干渉波発射源の位置推定技術

Geolocation Technique for Sources of Satellite Communication and Broadcast Interference

上村 幸弘

■ KAMIMURA Yukihiko

野沢 達哉

■ NOZAWA Tatsuya

静止衛星による通信・放送の利用拡大が進み、衛星の軌道と電波の混雑が激しくなるなか、電波干渉によりサービスに障害が発生するなど、衛星を利用するユーザーへの不利益が生じるケースが増加している。地上から衛星に向かって送信された電波（アップリンク波）に干渉があった場合、干渉波発射源を特定するためには、従来は、衛星から地上に届く電波（ダウンリンク波）を受信し、干渉波の波形や復調画像などの特徴から、人間が勘と経験により干渉波発射源を特定せざるをえなかった。

東芝は、静止衛星からのダウンリンク波を受信して特殊な信号処理を施すことにより、容易に干渉波発射源の位置推定が行える技術を開発した。

While the current expansion of satellite communication and broadcasting services has brought about social benefits, at the same time it has also created overcrowded orbits in space as well as congestion of the radio wave spectrum. If a geostationary satellite were to suffer a jamming intrusion into its uplink for whatever reason, location of the jamming source would be necessary. However, this is a technical challenge that is yet to be solved.

As an answer to this situation, this paper briefly introduces Toshiba's in-house experimental research efforts to estimate the possible location of a jamming transmitter by a novel scheme of signal processing applied to the collected downlink signals. Our hope is that this work will help to pave the way toward a new perspective of radio wave administration in space.

1 まえがき

衛星を利用した通信や放送は、近年、利用の拡大が進み、それを支えるインフラは非常に重要なものとなっている。衛星利用の拡大に伴い、地上局が送信する送信波が、誤って他の衛星回線に混入する干渉事例が増えており、衛星通信・放送事業者及びサービス利用者にとって大きな問題となっている。この問題を解消するため、干渉の原因となっている電波発射源を特定し、少しでも早く排除したいというニーズが高まっている。

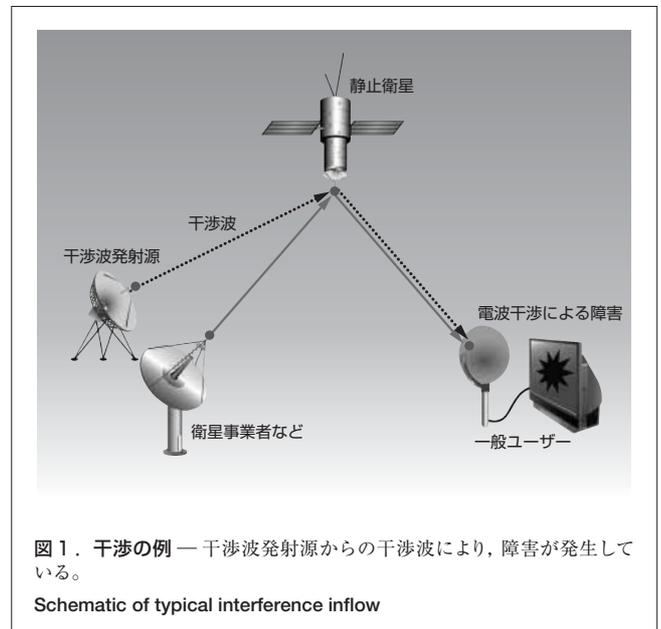
しかし、衛星通信・放送における干渉は、干渉波を衛星経由で受信するため、地上に存在する本来の干渉波発射源の位置を特定するのは難しいという事情がある。

東芝は、衛星からのダウンリンク波を受信し、その受信波に内包される情報を分析処理することにより、地上の干渉波発射源の位置を推定する技術について研究開発を進めてきた。ここでは、その技術の概要及び開発状況について述べる。

2 衛星通信・放送における干渉

2.1 干渉発生の仕組み

衛星通信・放送における干渉は、衛星に対して送信を



行う地上局が、ほかの地上局が使用している衛星回線に対して、同一周波数で電波を送信した場合に発生する。図1に示すように、二つの地上局から互いにスペクトルが重なり合う電波が送信され、衛星がそれらを一つの中継器（トランスポンダ）で同時に中継することにより、干渉が発生する。この

電波を受信したユーザーは電波干渉による障害を受けることになる。

2.2 干渉が増加している背景と干渉の事例

干渉が増加している背景には、衛星数の増加に伴う静止衛星の過密化、及び周波数資源の不足が挙げられる。

以下に、これまでに発生した干渉の事例を挙げる。

- (1) 人為的なミスによるもの アップリンク送信アンテナを、本来使用すべき衛星とは異なる衛星に、誤って指向し送信した場合に発生することがある。

例えば、衛星通信車載局は、移動する先々で、そのつど、使用する衛星の方向にアンテナを指向し電波を送信する。このとき、意図せず誤った方向にアンテナを指向してしまい、電波を送信する可能性がある。

- (2) 機器の故障によるもの 機器の故障により、本来送信すべき周波数と異なる周波数で送信した場合に発生することがある。

例えば、固定局であるVSAT局 (Very Small Aperture Terminal) は、小型・軽量で局の開設が容易であるためユーザー数が多い。このような背景もあり、VSAT局の故障による干渉の事例が多数報告されている。

- (3) 故意の妨害によるもの 海外などでは、衛星放送チャンネルの乗っ取り(電波ジャック)が実際に起きた事例がある。

2.3 従来の干渉波発射源の位置推定方法

地上波どうしの干渉においては、干渉波の到来方向を複数の地点で計測し、それらの交点から干渉波発射源の位置を推定する方法が使用されている。

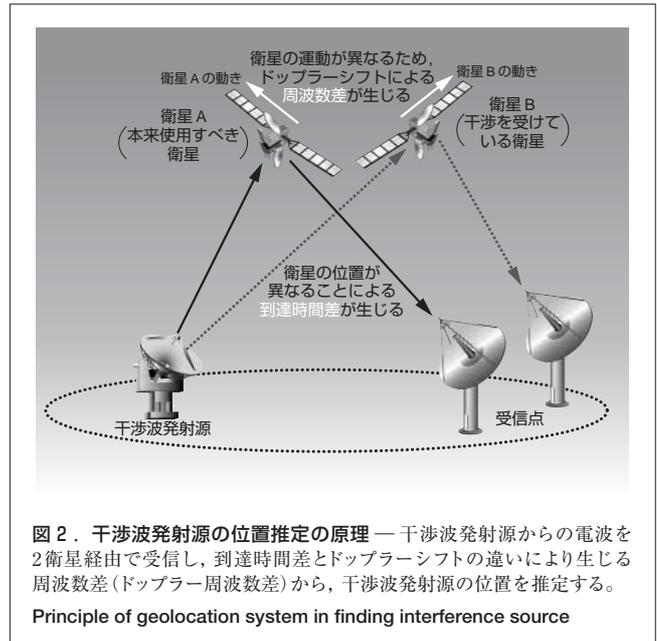
一方、衛星通信・放送での干渉においては、地上局から衛星に向かって干渉波が送信されるものの、衛星は地上から送信された電波を折り返し地上に送信しているに過ぎず、真の干渉波発射源は地上にある。そのため、地上波と同じ方法で干渉波発射源の位置を推定することはできない。

そこで、これまでは、衛星通信・放送における干渉波の波形や復調波の特徴を抽出した後、あらかじめ既知として得られている特徴に一致する地上局を干渉波発射源として人が判断する、という方法を採用せざるを得なかった。ただし、この方法では、顕著な特徴を持たない干渉波の場合は、地上局の特定が極めて困難である。また、地上局が特定できたとしても、干渉波発射源が移動する地上局の場合は、その位置を直接知ることはできないという問題が生じることになる。

3 干渉波発射源の位置推定技術

3.1 位置推定技術の原理

干渉波発射源の位置推定を行うためには、干渉波発射源の電波を異なる2衛星経由で、別々のパラボラアンテナを用



いて受信するという方式をとる(図2)。経由する2衛星とは、“本来使用すべき衛星”と“干渉を受けている衛星”である。

受信点までの2衛星経由の経路差による電波の到達時間差と、2衛星の軌道運動の違いにより生じるドップラーシフトの周波数差(以下、ドップラー周波数差と呼ぶ)から、干渉波発射源の位置推定が可能になる。

ここで、干渉波発射源の位置を推定できる条件は、次のとおりである。

- (1) 2衛星の中継器(トランスポンダ)が、互いに近接した周波数帯域を持ち、干渉波のスペクトル成分を同時に中継できること
- (2) 2衛星が南北方向に1日周期で相対運動を繰り返していること

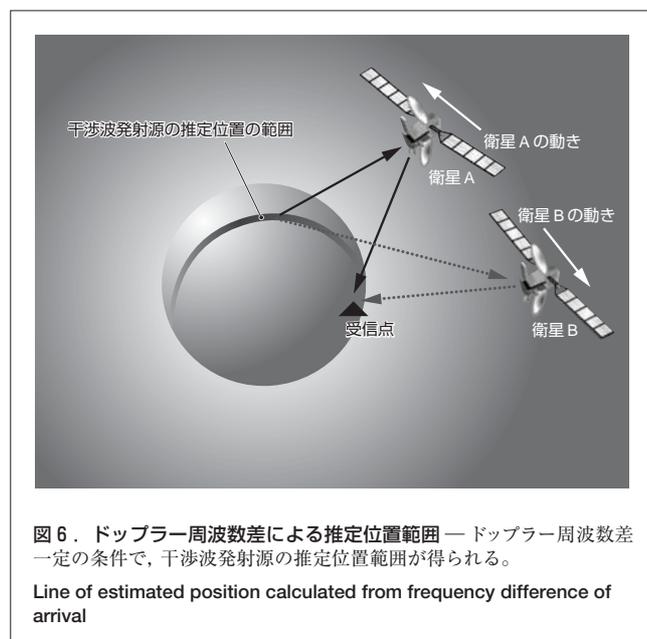
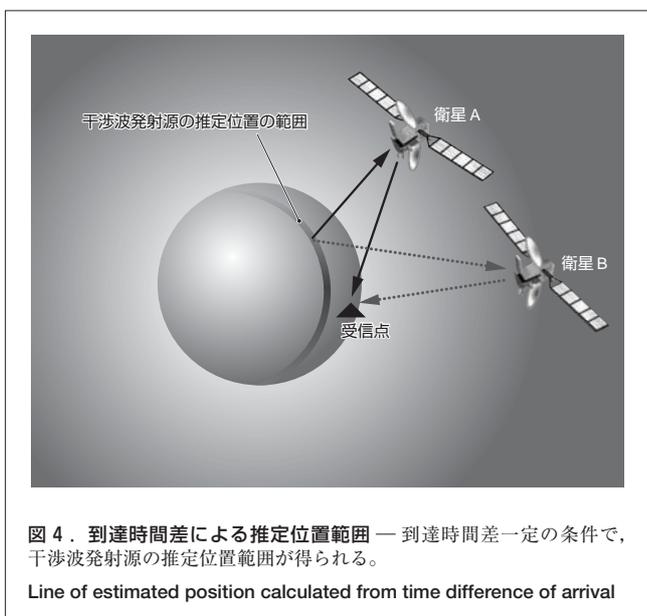
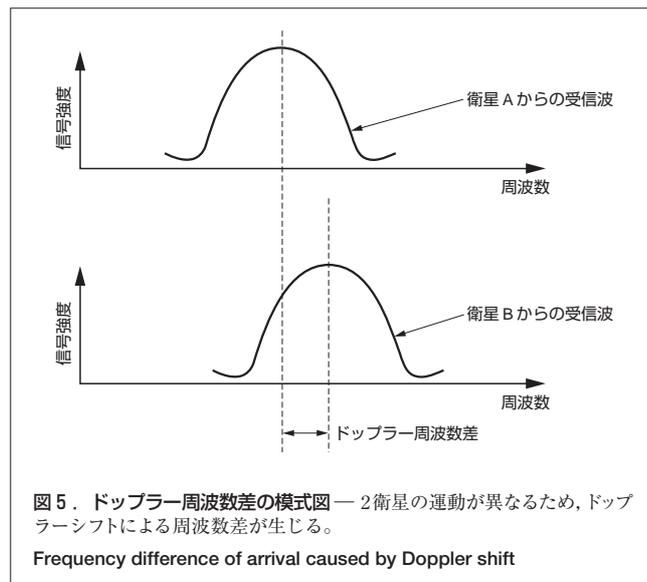
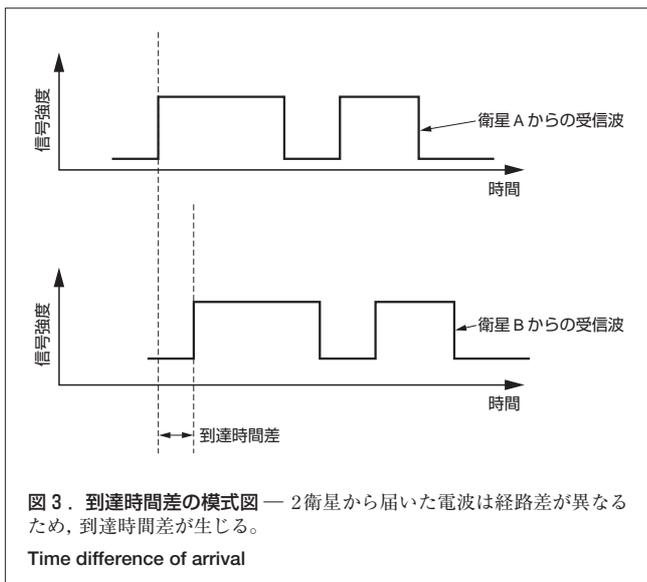
(1)は干渉が発生する前提条件である。(2)は赤道軌道面から若干の偏移を生じる静止衛星として、一般に成り立つ条件である。

3.2 到達時間差による南北方向の位置推定

図2のように、干渉波発射源から送信された電波を、衛星Aと衛星Bの2衛星を経由して、受信点で2基のパラボラアンテナにより受信する場合を考える。2衛星の位置が異なるため、電波の経路長も異なり、図3の模式図に示すように到達時間差が発生する。

この到達時間差から経路差を算出できる。また、経路差と、衛星A、衛星B、及び受信点の位置関係から、干渉波発射源位置の範囲を算出することができる。到達時間差による干渉波発射源の推定位置の範囲の例を図4に示す。

ここに示す範囲は、2衛星経由の経路差が一定となる双曲線を中心とする領域となる。2衛星は赤道上空に東西に並



んでいるため、この範囲は南北方向に伸張した地域をカバーすることとなる。

3.3 ドップラー周波数差による東西方向の位置推定

静止衛星は、マクロ的に見ると赤道上空に静止しているが、ミクロ的に見ると、赤道を中心として南北方向の周期的偏移を1日単位で行っている^(注1)。

この周期は各静止衛星とも同じであるものの、偏移の方向の差異により、発生するドップラーシフト量は異なる。図5は、これを模式的に示したものである。

2衛星のドップラー周波数差に加えて、衛星A、衛星B、受信点の位置関係、及び衛星A、衛星Bの偏移方向の相対

関係から、干渉波発射源位置の範囲を算出することができる。

ドップラー周波数差による干渉波発射源の推定位置の範囲の例を図6に示す。

衛星の周期的偏移が南北方向であるため、干渉波発射源の緯度により、衛星から地表方向への速度成分が異なり、ドップラー周波数も変化する。このため、ドップラー周波数差が一定となる範囲は、東西方向に帯状に伸張した地域となる。

3.4 干渉波発射源の位置推定

干渉波発射源の位置は、到達時間差とドップラー周波数差から得られた推定位置範囲の交点を、地球上の位置として求めることにより算出できる。

二つの範囲の交点から干渉波発射源の位置推定を行う

(注1) 軌道傾斜角により、赤道面から100分の数度程度ずれている。

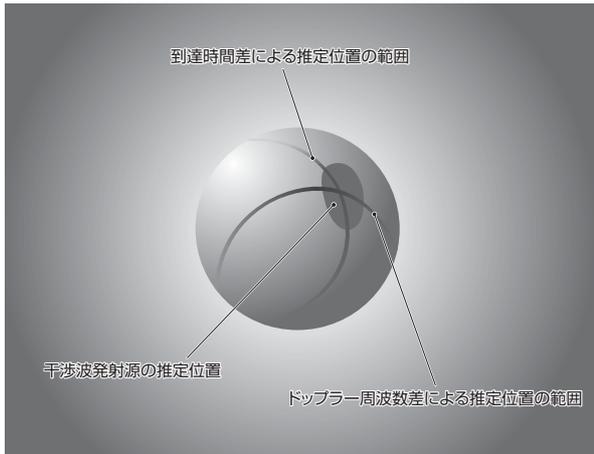


図7. 位置推定 — 干渉波発射源の位置は、到達時間差による推定位置範囲とドップラー周波数差による推定位置範囲の交点として推定される。

Estimated position

方法を、図7に模式的に示す。

4 東芝の開発状況

東芝は、干渉波発射源の位置推定処理の試作及び評価を行っている。評価においては、図8に示すような実験設備を使用している。

これまでの評価実験では、到達時間差は数十 ns オーダ、ドップラー周波数差は数百 mHz オーダの精度で計測結果を得た。これを距離に換算すると、到達時間差による位置推定精度は数 km オーダ、ドップラー周波数差による位置推定精度は数十 km オーダということになる。

なお、前記の位置推定精度を一般的な手法で実現するためには、衛星からの信号の波形を高分解能で長時間取得し、

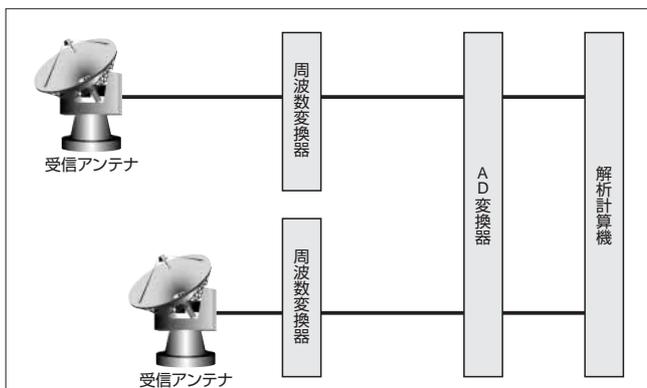


図8. 実験設備のブロック図 — 2基のパラボラアンテナで受信した信号を周波数変換し、AD(アナログ/デジタル)変換器でデジタルデータ化して解析する。

Block diagram of experimental setup

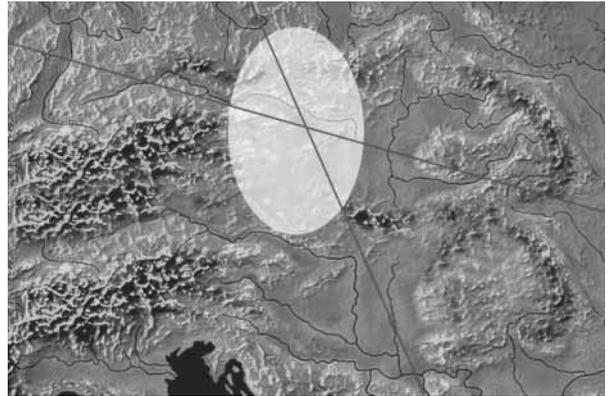


図9. 位置推定結果の表示例 — 干渉波発射源の位置推定結果が地図上にプロットされる。

Example of estimated position display

解析計算機で処理を行う必要がある。しかし、高分解能で長時間分の波形データは、データ量が多くなるため、解析計算機での処理量が増大する。その結果、推定位置を得るまでの時間が長くなるという問題が生じる。この問題を解決するために、当社は独自のアルゴリズムを開発し、位置推定精度を劣化させることなく処理時間を短縮することに成功している。

また、運用面においては、位置推定結果を図9に示すように地図上にプロットすることにより、干渉波発射源となっている無線局の特定を容易にする工夫も行っている。

5 あとがき

衛星通信・放送の安定的な運用のために、干渉波発射源の位置を高精度で短時間で推定できる技術を開発した。

今後は、更なる位置推定アルゴリズムの改良により、位置推定精度の向上や位置推定に要する処理時間の短縮などを進めるとともに、この技術を衛星電波監視のシステムへ適用していきたいと考えている。



上村 幸弘 KAMIMURA Yukihiro

社会ネットワークインフラ社 小向工場 レーダ・センサ技術部。
電波応用システムの開発・設計に従事。
Komukai Operations



野沢 達哉 NOZAWA Tatsuya

社会ネットワークインフラ社 小向工場 レーダ・センサ技術部。
電波応用システムの開発・設計に従事。
Komukai Operations