

カップ・ロケットのドバップ実験について

ドバップ 研究班

1. 緒言

ドバップ (DOVAP) は Doppler Velocity and Position の略で、電波のドップラ効果を利用して速度を求め、これから距離を算出して位置を標定する一つの方法である。観測ロケット計画の当初より、ロケット航跡標定の一つの手段としてその採用を予定していたが、予算上の制約から実用が遅れており、ようやく、昨年 3 月の K-7 型以来、数回にわたって試用の機会をえた。以下、その経過と、この間明らかになった二三の問題点について述べることにする。

2. ドバップにおいて考慮すべき点

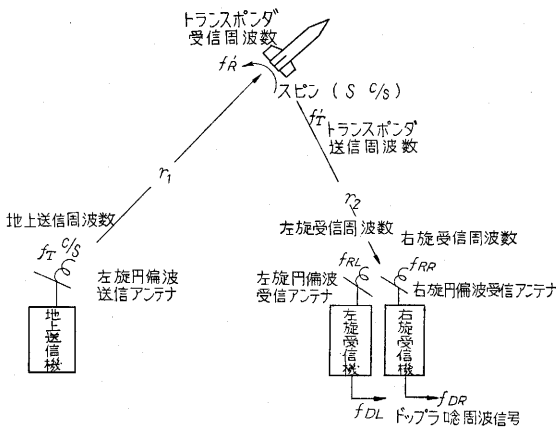
(1) スピンの影響 ロケットの場合、スピンの伴って受信不能の時が生じないようにするため、ロケットには直線偏波のアンテナを装着し、これに対応する地上アンテナは円偏波のものにするのが普通である。この場合、スピンによって周波数に変化し、これが真のドップラ効果に重なるため、精密測定の場合には無視できない誤差を与える。スピンの影響を弁別、除去するためには、回転方向が反対の 2 組の円偏波アンテナを受信用に用いる必要がある。

第 1 図において、地上送信アンテナは左旋円偏波とし、スピンの方向は、地上から見て左回転の場合を正にとることにすると、次の関係がある。

$$f_{R'} = f_T \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dr_1}{dt} \right) - s \quad (1)$$

$$f_{T'} = 2f_{R'} \quad (2)$$

$$f_{RL} = f_{T'} \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dr_2}{dt} \right) + s \quad (3)$$



第 1 図 スピンの影響の除去

$$\approx 2f_T \left[1 - \frac{1}{c} \frac{d}{dt} (r_1 + r_2) \right] - s \quad (3')$$

$$f_{RR} = f_{T'} \left(1 - \frac{1}{c} \frac{dr_2}{dt} \right) - s \quad (4)$$

$$\approx 2f_T \left[1 - \frac{1}{c} \frac{d}{dt} (r_1 + r_2) \right] - 3s \quad (4')$$

$$f_{DL} = 2f_T - f_{RL} \\ = \frac{2f_T}{c} \frac{d}{dt} (r_1 + r_2) + s = f_D + s \quad (5)$$

$$f_{DR} = 2f_T - f_{RR} \\ = \frac{2f_T}{c} \frac{d}{dt} (r_1 + r_2) + 3s = f_D + 3s \quad (6)$$

$$s = (f_{DR} - f_{DL}) / 2 \quad (7)$$

受信に際してスピンによる周波数変化は、(3), (4) 式に示すように、左旋と右旋の受信アンテナに対して符号が逆になるため、双方の唸周波数出力には、スピンレートの 2 倍に相当する周波数の差が生ずる。(7) 式から明らかなように、この差から、方向も含めてスピンレートを知ることができ、真のドップラ効果に基づく唸周波数 f_D は、(5), あるいは (6) 式にスピンレートの補正を施すことによって求めることができる。

(2) ドップラ唸周波数の符号 ドップラ効果による周波数推移は、相対距離の増減に応じて、その符号が反対になる。ドップラ唸周波数をとり出す場合、普通のヘテロダイン検波では、ドップラ効果が正・負いずれの符号であるかを知ることができない。

しかし、観測ロケットの場合には、あらかじめ航跡について十分な予備知識があり、大略、どのような変化となるかを予想することは可能であるから、強いて正負の判別がデータの上で確定されなくても、符号をとり違えるおそれはないものと考えてよい。

(3) 伝播速度、伝播経路などの影響 大気中や電離層などの伝播媒質の性質によって、電波の位相速度が変化するとこれがドップラ効果に影響し、一様媒質として計算することが誤差の原因となる。

伝播速度が一様でない場合、ドップラ唸周波数は

$$f_D = 2f_T \left(\frac{1}{c_1} \frac{dr_1}{dt} + \frac{1}{c_2} \frac{dr_2}{dt} \right) \quad (8)$$

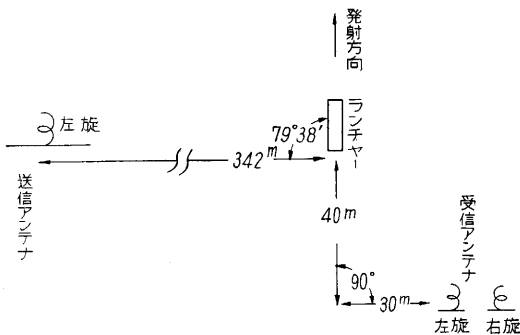
ここに、 c_1, c_2 はそれぞれ、ロケットの近傍における f_T および $2f_T$ に対する伝播速度である。

実際には伝播速度の分布を知ることは困難であるから、電離層その他で影響され難い周波数を選定する必要がある。

3. 実験経過概要

現在までにドバップの実験を行なったのは、K-7型、K-8D型、K-6H-1号機、K-8-5, 6, 7号機の6回で、ここでは、K-8-6号機までの結果についてまとめておく。

ドバップで位置の標定を行なうには、少なくとも3カ所以上の受信点が必要であるが、以上の実験は、いずれもドバップ装置の実用性を確かめることを目的としており、受信点は、道川実験場観測室にのみ設置した。機器の配置は、第2図に示すとおりである。



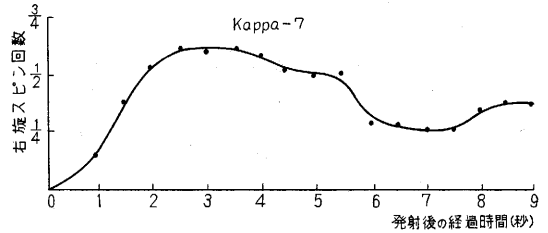
第2図 地上局の配置

送信アンテナと地上送信機とは、その第2高調波によって、地上受信機のトランスポンダ受信チャンネルが著しい妨害を受けないのに必要な最小限の距離をへだてて配置している。送受信アンテナとも2回巻のヘリカル型で、指向性は極めて広い。したがって、いずれも方向はロケット飛しよう方向に平行に、約45°の仰角で固定されている。

記録はソニー製のVR型テープ録音機を用いた。この再生ヘッドは磁束型 (flux-sensitive) で、また、録音、再生増幅器とも直流増幅器であるから、極めて低い周波数までの録音、再生が可能であり、また、再生速度を大幅に遅くともできる特徴がある。録音時に比し再生速度を1/30、あるいは1/100に落とし、出力をペン書きオシログラフで記録することにより、簡単にドブプラ唸周波数信号の忠実な記録がえられる。

この時期に用いたVR型録音機は2-トラックのものでその一方に左旋受信出力、他方に右旋受信出力を入れる。双方の再生記録を比較し、両者の位相差が4πになる(すなわち、最初から数えた唸信号のサイクル数の差が2になる)ごとに、1回のスピンのあったことになり、極めて緩慢なスピンも、極めて正確に求めることができる。なお、時間軸規正の目的で、時間目盛信号をいずれか一方に重ねて録音を行なっている。

(5) あるいは(6)式から明らかなように、 f_D の1サイクルの変化は、 r_1+r_2 の $\lambda_T/2$ (λ_T は地上送信波長)の変化に対応する。 $r_1 \approx r_2$ とすれば、1サイクル分



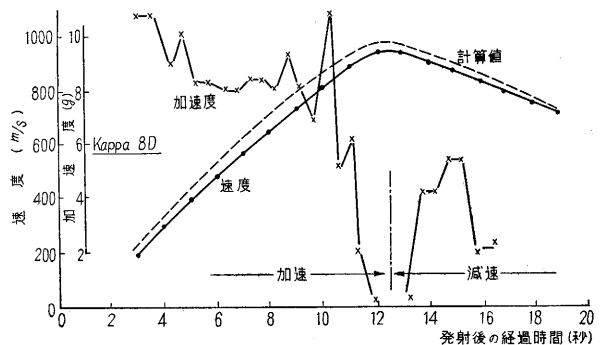
第3図 K-7型スピ特性

の直距離変化は $\lambda_T/4$ (カッパ用ドバップの場合は約1.88m)で、精度は極めて高くできる。確度はむしろ、地上送信周波数の安定度、地上機器の幾何学的相対位置、時間目盛の精度などによって決まると考えることができる。

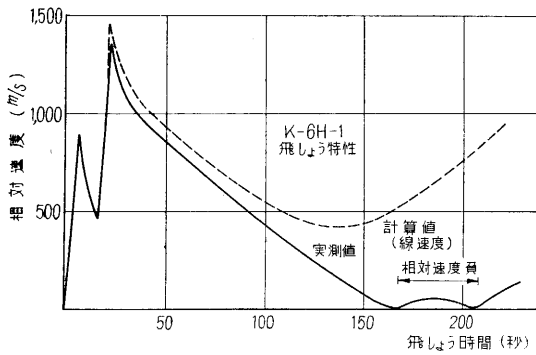
(1) K-7型スピン特性 第3図は発射後事故を起こすまでのスピンの状況を示したものである。この結果で特徴的なことは、スピンの方向が一定していないことで、すなわち、発射後初めの約2秒の間にロケットは右に半回転し、以後は逆方向にスピンを始めて、約4回転したところで、再び方向が反転し、右廻りのスピンになったことである。従来はテレメータ電波を利用し、直線偏波のアンテナで受信してスピンを測っていたが、これではスピンの方向までは判断できない。本データは初めてロケット噴射中には、スピンの方向が一定しない事実を示したものと、極めて興味深いものがある。

(2) K-8D型飛しよう特性 第4図は発射後約19秒間におけるK-8D型の速度変化と、これを微分して求めた加速度特性を示した。送受信点が発射機から若干離れているため、初めの約3秒間は著しく誤差があるが、それ以降は0.4%程度の正しさで、線速度を測定できる。加速度の結果は、分散が著しく大きく精度は期待できないが、一応の目安にはなると思う。

(3) K-6H-1号機飛しよう特性 K-8D型の場合約19秒以後における受信状況は、著しくS/Nが悪かった。この原因は全体として感度不足、特にトランスポンダに起因するものが著しいことが判明した。この点を改良して、K-6H-1号機の主ロケットに搭載して実



第4図 K-8D型の飛しよう特性



第 5 図 K-6H-1 飛しょう特性

験を行なった結果は、第 5 図に示すとおりで、全飛しょう時間約 240 秒間にわたり、ほぼ満足すべき受信状況がえられた。この間、レーダ観測により最大直距離は約 86 km に及んでいる。

ドバップの使用波長が長い為、ロケットに装着する空中線の性能を良くすることはなかなか困難である。特に 6 型主ロケットは、尾翼のスパンも小さいので、いっそうの苦勞があるが、折れ曲がり変形型のアンテナを開発したことにより、問題はいちおう解決された。

計算値との比較で、発射後約 40~50 秒間は、送受信点から見た直距離のベクトルとロケット速度ベクトルのなす角は 5° 以下であって、この間は相対速度の線速度に対する誤差は、 0.4% 以下である。それ以後は、相対速度は線速度にくらべて小さくできるようになり、約 170 秒付近で 0 となり、それ以後は負になる。すなわち直距離は近づいているわけである。さらに、約 210 秒で再び相対速度は 0 となり、それ以後は再び相対速度は正となっている。このようにデータの上では相対速度の正、負は確定していないが、状況から、それがいずれであるかは、容易に判定可能である。

なお、K-6H-1 号機は grenade を搭載しているが、

米国における報告のように、その爆発の瞬間におけるドップラ信号の異常は認められていない。

(4) K-8-5, 6 号機 この両者では、トランスポンダはブースタに搭載し、その飛しょう特性を求めるとともに、着水点の直距離を算出する目的に使用した。結果は第 6 図に示すとおり極めて良好で、所期の目的を果たしている。

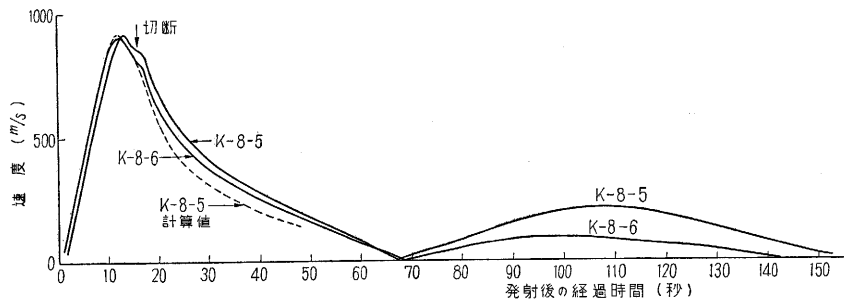
この結果で興味深いのは、切断にもなって抵抗による減速の状況が著しい変化を示していることである。図中の計算値にはそうした影響を入れてないから、両者を対比すれば、その相異は明らかであろう。

落下点までの直距離は、発射後着水までの唸信号のサイクル数を全部積算することによって求めることができる。ただし、相対速度が負の期間は、その分だけ差し引くことにする。K-8-6 号機では、正の期間のサイクル数は 12,875、負の期間が 2,433 で、積算総数は差し引き 10,442 であった。これから着水点までの直距離を求めた結果は、19.8 km である。唸信号の記録からサイクル数を数えることは、たいへん時間と手間のかかる仕事でドバップの欠点の一つといつてよい。

4. 結 言

以上、ドバップについてその試用の経過について述べたが、現在までの段階で、十分その実用性を確かめることができたといつてよい。ただし、これで実際の標定を行なうとすると、秋田実験場の地形から、適切な受信点配置が困難であるという問題がある。ドバップのもつ精度を十分発揮できないおそれがある。また、こうしたトランスポンダを用いる、いわゆる two-way 方式が、果たして遠距離用に適当であるかどうかとも問題であつて、なお、今後の研究にまつべき点が少なくない。

終わりに、装置の開発に協力された東芝の関係者各位に謝意を表する次第である。(1961 年 8 月 31 日受理)



第 6 図 K-8-5, 6 号機ブースタ飛しょう特性