

アマチュア無線家による

国産衛星の電波観測

吉 成 正*

国産科学衛星「大隅」の打上げ以来、日本人にとって人工衛星も大変身近かなものとなった。その後打上げられた「新星」「電波」によって本格的な科学観測が行なわれ、着々と成果が上っている事は誠に喜ばしい事である。

吾々アマチュア天文家にとって、直接観測データを集めて処理する術もないが、折角打上げられた衛星だから、大いに利用させて頂いてもよいのではないかと考え、衛星からの電波を受信し、ドップラー効果を確かめてみる事を計画した。

ドップラー効果は波動工学に於ける最も興味ある現象の一つである。音波のドップラー現象は、踏切を通過する汽車、電車の警笛や、パトカー、救急車のサイレン等で日常よく経験しているが、それにも拘らず、定量的に教材として提示されることが少いのは、録音するのが困難である故であろうか。

電磁波に於いては、光速度が余りにも大きいために、そのドップラー効果を検知するに困難を伴う。星雲団からの光のスペクトルの赤方偏移とか、太陽の赤道周辺部からの光の波長のずれ等は、一般には実験上検証することなく、知識を一方的に押し付けているのが現実である。

1957年10月スプートニク打上げ以来、地球を巻く大気圏外には、常時1000個を越す人工天体が運行するようになり、これらの人工天体を利用すれば、ドップラー効果を観測出来る可能性が出て来た。

信号強度と受信機

限られた質量の人工衛星からの電波の出力は、数10mW～数W程度であり、到着距離も天文学的な距離ともなると極めて信号が微弱（-130 dbm程度）となるので、高利得のアンテナと高感度、狭帯域でS/Nの高い受信機が必要である。アマチュア無線家(Ham)用人工衛星「オスカー」の受信経験から、高周波増幅2段付のダブルスーパー以上の受信機と5～7エレメント(素子)の八木アンテナは最低限必要である。

周波数の偏移

ドップラー効果による周波数の偏移 Δf は、発振周波数 f_0 、衛星と観測者の相対速度を v 、観測者に対して $\angle\theta$ の方向に運動しているとすると、

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{v \cdot \cos \theta}{c} \quad \dots \dots (1)$$

で表わされ、 $v=7 \text{ km/s}$ 程度では

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{7 \times 10^3 \text{ m/s}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \cos \theta \approx 2.3 \times 10^{-5} \cdot \cos \theta$$

10万分の2程度の偏移では、ヘテロダイン周波計で測れたとしても確度が、 2.2×10^{-5} でほぼ等しいため、誤差との区別が出来ない。しかし f_0 が高くなれば、 Δf の絶対値は大きくなるので、クリスタルコンバーター(水晶による周波数変換器)で、超短波の f_0 を短波帯に周波数変換してから読取る事で2桁の精度向上が得られる。

受信装置

受信周波数は国産衛星のビーコン波 136MHzとし、ハム用の144MHz用を改造することにした。

アンテナは従来使っていた7エレの八木アンテナを、ブーム(横軸)を延長して8エレとし(図1)，ハムと衛星の両用とした。最近のハムはモービル局を相手に垂直偏波を多く使っているので、144MHzのスプリアス(妨害電波)が有ってもその妨害から逃げるために水平偏波で使用した。追尾は手動で、マスト(支柱)を廻わしたり、北極星の方向に傾けて赤道儀式にしたり、毎回軌道に合せて振り廻わすので、親切な近所の人がわざわざ「アンテナが倒れそうだ」と教えて呉れる事もしばしばであった。

親受信機は万一のトラブル時を考慮して2系統準備した。左チャンネルに米国ハマーランド製スーパープロとヘテロダイン周波計、右チャンネルに国産のトリオ製SSB用JR310改造受信機をセットし、共に第1IF(中間周波)の5MHz帯で動作させ、JJY用受信機の出力と共に、ステレオテープデッキの左右チャンネルに録音しながら、ステレオヘッドホンでモニターした。生データは出来るだけリアルタイムにノートに残すよう努めた。

周波計は確度50Hzであるが直読ではないので測定に

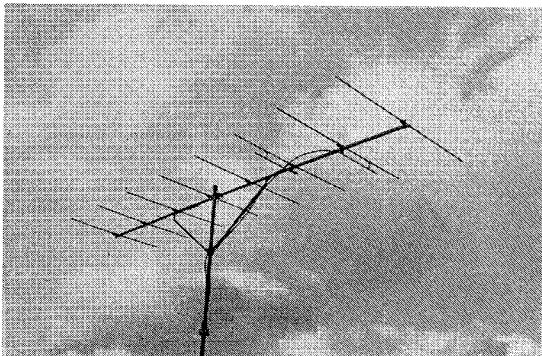


図1 人工衛星追跡用エレメント八木型アンテナ

* 新潟工業高校教諭、JARL 新潟県支部長

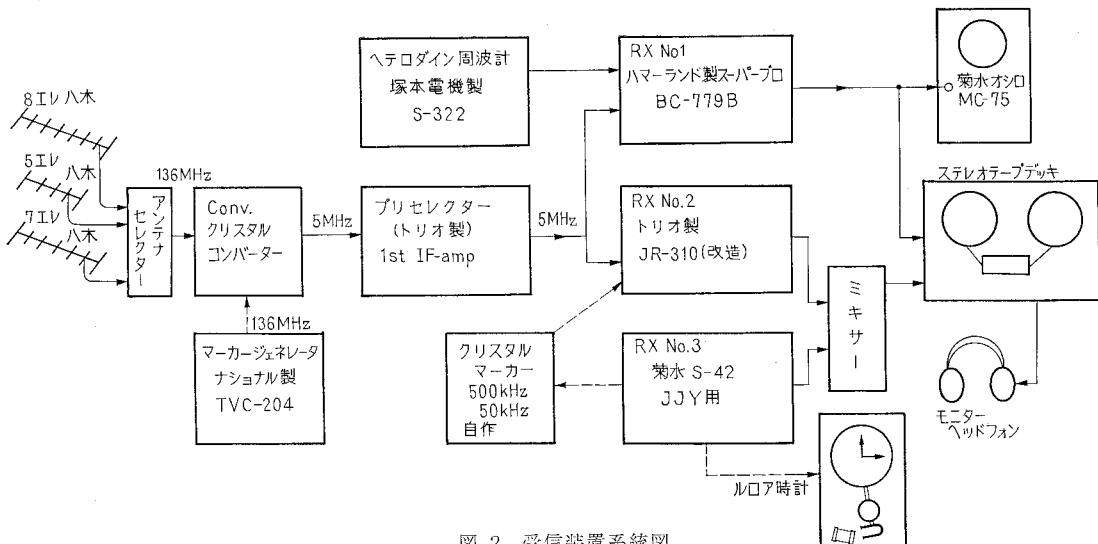


図 2 受信装置系統図

時間が掛るので、SSB（単側帯波）用受信機の直読ダイヤルを再調整し、トラッキングエラーがバーニヤダイヤルで最小になるようにし、バーニヤに更にバーニヤを追加して最小目盛 500Hz の 1/10 の 50Hz が読めるようになった。ドリフト特性も勿論取ってあり、スイッチオン直後の 3 分間待てば、周波数は満足出来る位安定になり、トランジスターの有難さがしみじみと感ぜられる。長時間使用の変動は温度上昇によるもので、2 時間で約 1kHz であるが、受信周波数の絶対値は必要なく、短時間（20 分位）の偏移分だけ読めればよいので、VFO（可変周波数発振器）は恒温化していないが、現在では温度が読めるよう曲管温度計を組込んである。

クリスタルコンバーター（クリコン）はトランジスタ式で RF（高周波増幅）2段付を親受信機から離して、薬の空缶に電池と共に入れ、入力側には 5MHz の IF トランジスタが入れてある。局発水晶は「大隅」のビーコン用に特注したので「新星」では IF 出力周波数が若干変

わり、受信が 2 系統使えるようになった。親受信機との間にプリセレクターを入れ、必要に応じて 2 段増幅が動かせられるようにしてある。

アンテナ系は後に 7 エレと 5 エレを追加し、アンテナ切換器で、3 本の八木とブラウン型の計 4 本をシャッタ（無線室）で、西向、南上空向、東向をパラパラと切換え大変便利になった。

時計は NHK の払下品のルロア型で自家修理し、日差 0.25 秒以内に調整したものを用い、スピノ測定用に 1/10 秒のストップウォッチを並用した。（図 2, 3, 表 1 参照）

理論と予想値

前記の(1)式に「新星」のビーコン周波数 f_0 、近地点相対速度 v を代入して、偏移 Δf を求めると、（図 4 参照）

$$\Delta f = -\frac{f_0 \cdot v \cdot \cos \theta}{c} = \frac{-1.36695 \times 10^8 \times 7.288 \times 10^3}{2.997925 \times 10^8} \times \cos \theta = -3.32 \times 10^3 \cos \theta \text{ [Hz]}$$

近づく時に Δf だけ高まり、遠去かる時に Δf だけ低くなるので、全偏移 $\Delta F = 2\Delta f$ と観測される。

表 1 受信装置

1. アンテナ 8 エレ八木型 地上 15m 高手動追尾 後に 7 エレ、5 エレ八木型追加
2. クリスタルコンバータ RF 2段出力 5MHz 帯
3. 第1 IF 用プリセレクタ トリオ製
4. 親受信機(A) 米国ハマーランド製 スーパープロ BC-779B
(B) トリオ製 JR 310 読取精度 50Hz
5. JJY 用受信機 菊水 S42 およびクリスタルマーカ
6. ヘテロダイン周波計 塚本電機製 S-322
7. 時計 ルロア型 (NHK 放送局仕様)
ストップウォッチ セイコー 1/10S
8. オシロスコープ 菊水 MC-75
9. 記録装置 ソニーステレオデッキ TC 255
10. マーカージェネレータ ナショナル製 TVC 204

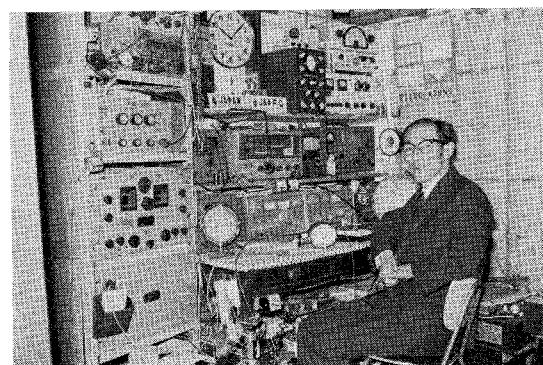


図 3 JAφAW 局

$\theta=0^\circ$ (軌道上で観測した) とすると、全偏移は

$$\Delta f = 2Af = 6.64 \text{ [kHz]}$$

となるが実際に地上で観測する場合にはこれより小さい値となるが、果して観測値が何程この値に肉薄するであろうか。

衛星の運動方程式を立てて前式に入れ、微分し更に最接近する時刻を代入すると次式が得られる。

$$f'_{\max} = \frac{f_0}{c} \cdot \frac{r \cos \alpha}{a} \cdot \frac{v^2}{R_{\min}} \quad \dots \dots (2)$$

但し a : 軌道半径, r : 地球半径

α : 軌道面と観測点との地心角

R_{\min} : 衛星迄の最短距離

即ち「偏移（ずれ）」の時間的変化の最大値 f'_{\max} は速度 v の 2 乗に比例し、最短距離 R_{\min} に反比例する。」

従って、 f' を観測によって求め、地心角 α と速度 v を与える事によって距離 R_{\min} が求められる。

$$R_{\min} = \frac{1.366950 \times 10^8}{2.997925 \times 10^8} \cdot \frac{6.378165 \times 10^6}{7.750322 \times 10^6} \cdot \frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{f'_{\max}}$$

$$= 0.3752389 \cdot \frac{v^2 \cdot \cos \alpha}{f'_{\max}} \quad \dots \dots (3)$$

昭和46年9月28日（火）大安吉日、待ちに待った国産科学衛星「新星」打上げの成功。ソレッとばかりに受信機のスイッチを入れたかったが、何たる不運!! この日から3日間理科センターの実験講習会で出張中の我身、軌道がどんどん西へずれて行く、イライラしながら夕刻帰宅し直ぐにスタンバイ、受信機をチェック、マーカー（標準信号）出力をオンにして両受信機から最大に出力が得られるようにして、アッテネーター（減衰器）をしほる、-50 dB でも OK、マーカーをはずし、テープレコーダーを走らせ乍らダイヤルを微細に追う。100 mW の電波がキャッチ出来るだろうか。

クリコンの局発が正確に発振しているだろうか、誤差は分らない。衛星の軌道要素も分らない。一抹の不安が頭をかすめるが、「いや必ず受かる筈だ」と自分に云い聞かせ乍らワッチ（受信待機）する。やがて7時のニュースでようやく軌道要素の一部が分る。ノートするのももどかしく思う矢先、2台の受信機はゆっくり変化するビート音をステレオで発しているではないか。時に19時05分50秒。ダイヤルをよく合わせると、信号強度 S-2 で可成り強い。速い QSB（フェーディング）を伴う……スピシンしている、20分10秒フェードアウト。3周目がキャッチ出来たらしい。4周目でもう1度確認しなければいけない。2時間後21時は何も入感しない。テープをもう一度聞いてみる。確からしい。明日以降の軌道を計算して、ワッチすべき時間を割出す。19時入感時には衛星はボルネオ北部上空を通過中で、距離は 4000 km であった。次の4周目は地平線下で NG、翌29日は、5時（9周）、7時（10周）共に入感せずで、日中のワッチが

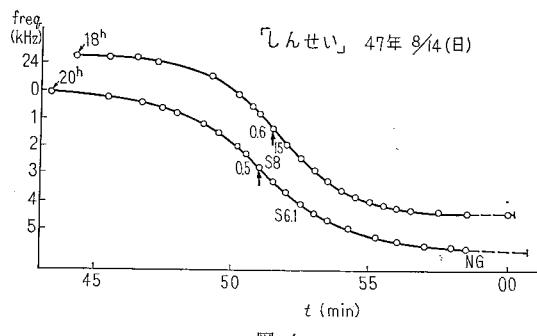


図 4

出来ないため当分おあづけになった。10月3日（日）午前11時47分から6分間入感、スピシン測定に成功、100回の所要時間は、35.2秒で、2.84 r.p.s.（毎秒回転）となり、発表された 2.8 r.p.s. と一致する事でようやく確認出来た。

続いて13時37分から9分間に64周目で、ドップラー偏移 4.5 kHz が測定出来て、所期の目的が達せられた。

その後は毎日2~4回観測が順調に運んだが、勤務中の観測は授業の合間に暇をもって自宅にフッ飛んで帰る事も有った。1分毎に周波数を読み、スピシンの100回転を数えながらストップウォッチを押し、4~5分置きに屋上に駆け上ってアンテナの向きを直すと云う猛烈な忙しさの連続、夜間になれば寝る暇も無くなるし、光学的観測なら空が曇れば見えないのでお休みが出来るが、VHF（超短波）は電離層にも無関係に入感するので年中無休である。しかし真夜中の観測でも必ずコマンドが掛って、データ回収されている音を聞いている時、この瞬間にも起きて働いているプロの方々が居るのだなあと勇気付けられ、暫し眠気を忘れさせて呉れた。

12月末迄に94回、47年9月迄には200回を越えるドップラー偏移のデータを取る事が出来、更に47年8月19日には第2号科学衛星「電波」も打上げられ、「電波」のデータも20回程得られた。

8月24日（木）12時には、先ず「新星」が現われ、数分後に「電波」も一緒に聞えて来て、混信してダブルビートが出て2つのビートを聞き分けねばならなかった。

その頃はもうかなり馴れて、2波混信しても、アンテナを切換ながらスピシンの違いを利用して、20秒毎に交互に測定してデータが取れる程になった。しかし9月14日の観測を最後に体がノックダウンとなり観測を断念せざるを得なくなってしまった。

受信の結果主なものを拾って次頁の表に示す。

46年11月19日18時43分に近地点付近で最接近し、 $\Delta F = 5.90 \text{ kHz}$, $f'_{\max} = 1.06 \text{ kHz/min}$ を記録した。この時軌道面は地心角 $\alpha = 5.9^\circ$ 最接近し相対速度 $v = 7.288 \text{ km/s}$ とすると、 $R_{\min} = 1262 \text{ km}$, $\theta = 27.5^\circ$ が得られる。

月 日	周	時 刻 (JST)	ΔF (kHz)	f'_{\max} (kHz/min)
46年				
11/15 (月)	615	18:38:00	5.80	0.95
"	616	20:37:30	5.80	1.00
11/16 (火)	628	19:09:20	5.80	1.05
11/17 (水)	641	19:40:30	6.00	1.00
11/19 (金)	666	18:43:18	5.90	1.06
11/20 (土)	679	19:15:00	5.65	1.10
12/12 (日)	956	12:43:50	4.4	0.370
12/19 (日)	1046	14:21:30	1.7	0.160
12/20 (月)	1056	08:52:00	4.55	0.450
47年				
1/ 5 (水)	1256	01:09:45	5.50	1.10
1/ 9 (日)	1319	23:47:36	5.70	1.12
2/ 6 (日)	1671	14:23:15	4.30	0.400
3/ 4 (土)	1921	04:26:00	5.0	1.10
8/15 (火)		19:22:45	5.85	1.10
8/16 (水)		17:54:45	5.775	1.15

即ち中国南部上空 3300 km 付近から地平線上に現れ本州南方で高度角 43°、最短距離 1262 km を通過した。

遠地点付近で接近する時には、地心角 38°、5500 km の地平線下から、頭上近い高度角 61° で 2260 km 位迄近づいた事になる。

当初アンテナを水平のまま使っていた時、衛星が頭上近くになると聞えなくなるので、上空へ向けたら強く入感するようになった。信号強度は S-8.7 位迄強くなる。地平線下に没して了っても、尚も聞いていると約 1 分間隔で 3 回位干渉による信号をキャッチする事が出来る。西の地平線から昇る時もビームを正確に向ければ、回折干渉波が断続して地平線上に現われると急に強くなる。

近地点の接近は、46 年 11 月 17 日から 47 年 8 月 15 日迄の間に 5 回有ったので、1 周するのに 54.4 日掛った事になり、 $\omega = \frac{360^\circ}{54.4d} = 6.618^\circ/d$ が得られた。

自転周期 P は 1319 周迄の前半と後半を比べて見たが、0.011 min 程度の減少で殆んど変化していない。

スピニスは絶えず変化しているように思われる。特にデータが回収されている時に、二次または三次曲線的にわ

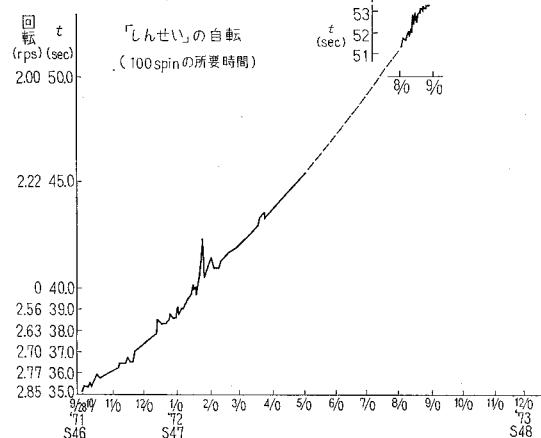


図 5

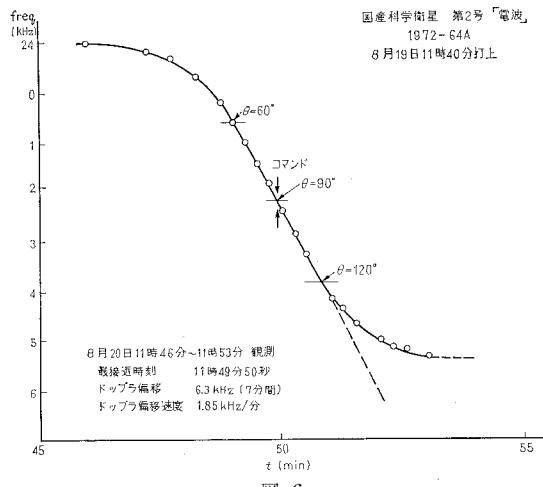


図 6

ずか変化するので、これは私の推測であるが、軸上にセットされた、 LEC 製のデータレコーダのテープがエンドレスでなく一方から他方へ移動するために慣性能率が変わるからではないだろうか。スピニスのエネルギー損失は大きく、46 年 10 月始め 2.84 rpm であったが、47 年 9 月 15 日には 1.85 rpm に減少してしまった。

2 号科学衛星「電波」は打上翌日 8 月 20 日 11 時 49 分 50 秒に接近した時、新星では経験した事もない程の速さで周波数が下った。毎秒 30.83 Hz のものすごいまで、わずか 7 分間で地平線の彼方へ去ってしまった。最大偏移 6.30 kHz、最短距離 $R_{\min} = 830$ km になった。スピニスは大変生きが良くて 3.028 rps であったが、9 月 16 日の測定では、2.950 rps に迄減じていた。

当初ドップレー偏移を確認するだけの目的で始めた観測が、「新星」の意外に長い寿命のため、とうとう一年間付合はめになってしまった。不充分な機材でも調整だ

(186 頁へつづく)

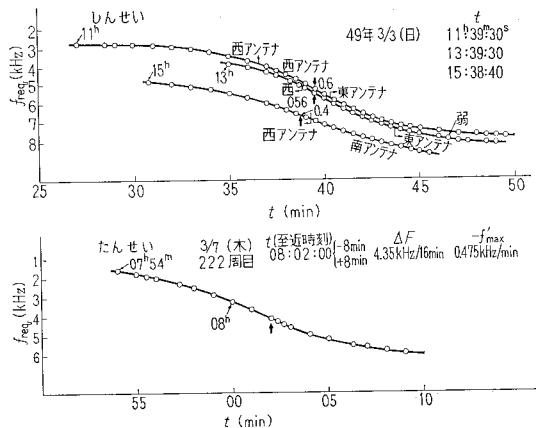
[注] \downarrow の矢印は最接近

図 7 最近のしんせいおよびたんせいの観測結果