

Cosa è il Doppler?

QUESTO ARTICOLO dedicato al Doppler si ricollega idealmente a quello "Cosa è lo Squint?", pubblicato su RR 2/91, scritto anch'esso nell'intento di trattare i fenomeni più interessanti che si incontrano nel traffico via satellite.

Il "Cosa è?" implica analizzare l'effetto Doppler smontandolo, per così dire, pezzo per pezzo, utilizzando le osservazioni che si accompagnano alle variazioni di frequenza dei segnali ricevuti dal satellite. Siccome l'effetto Doppler trova applicazione in tutti i settori tecnologici, dalle telecomunicazioni alla missilistica, fino alla diagnostica medica, ci si propone di analizzare in che consiste e sul come influisce sulla frequenza dei segnali emessi da un oggetto in movimento rispetto ad un punto fisso in cui sono ricevuti o quando in generale esista una differenza di velocità relativa fra chi trasmette e chi riceve.

L'osservazione dell'effetto Doppler

Chi è abituato a ricevere i segnali da satelliti a bassa orbita (LEO), tipo Fuji Oscar-20, sa benissimo che il segnale del beacon in 70cm gli appare circa 10 kHz più in alto rispetto alla frequenza nominale quando il satellite sorge e si avvicina (AOS).

Il beacon si abbassa gradualmente di frequenza e passa per quella nominale nel momento esatto di massimo avvicinamento (TCA) e scende di circa altri 10 kHz quando il satellite arriva al tramonto (LOS). In tutto, la frequenza del beacon varia di circa 20 kHz e, cosa importante, ci appare sempre in diminuzione, ma al sorgere è sempre più alta della frequenza nominale del beacon e al tramonto è sempre più bassa.

L'OM attento si accorge però che lo stesso fenomeno si manifesta anche sui segnali traslati in SSB dal transponder invertente, ma in misura minore che sul beacon e se comincia un QSO al sorgere in orbita discendente e lo continua con la stessa stazione -

diciamo DL - la frequenza dei segnali varierà in tutto di circa 15 kHz.

Come si spiega allora, si chiede l'OM attento, che il beacon varia di più e il traslato di meno e addirittura che in orbita discendente, per la stazione DL la frequenza si abbassi e per lui si alzi nello stesso momento?

E perché, si chiede, tutto si svolge alla rovescia se il satellite sorge da Sud in orbita ascendente e, dopo il punto di massimo avvicinamento, per lui la frequenza si abbassa e per il DL si alzi nello stesso momento?

Questa variazione, che nel ricevitore è un fatto reale, ma di entità relativa e diversa se misurata in due ricevitori posti in QTH che vedono uno il satellite allontanarsi e l'altro avvicinarsi nello stesso momento, sarebbe addirittura nulla ricevendo il beacon se ci trovassimo a bordo del satellite.

Lo stesso fenomeno si verifica su satelliti tipo AO-10 e 13, ma in misura meno appariscente e con andamento addirittura contrario, perché al sorgere la frequenza è più bassa e al tramonto è più alta.

Vedremo che ciò è legato al tipo di orbita ellittica Molnya ad elevata eccentricità in cui il satellite quando sorge si allontana e quando tramonta si avvicina, a differenza di quanto accade con satelliti in orbita circolare.

Gli OM che fanno traffico sui satelliti digitali compensano il Doppler con sistemi automatici, ma chi lavora su satelliti analogici in CW o SSB, insegue manualmente il corrispondente e se stesso durante il QSO. Ciò ha un fascino particolare perché il Doppler caratterizza il timbro dell'emissione e nessun utente di satelliti analogici vorrebbe privarsene. Questi sono gli elementi che l'OM osserva durante il traffico. Cerchiamo ora di inquadrarli nella teoria del fenomeno fisico che accompagna la variazione di frequenza dei segnali che vanno e vengono dal satellite.

Cosa è il Doppler?

Questo effetto è così chiamato dal nome del fisico Johann Cristian Doppler, che lo descrisse per la prima volta nel 1842 in una pubblicazione nelle memorie dell'Accademia delle Scienze di Praga, guadagnando così un posto di tutto rispetto nella storia della Fisica, dell'Astrofisica e della Cosmologia.

In quell'articolo, a quell'epoca, Doppler sviluppava la sua teoria immaginando ciò che si doveva osservare sulle creste di un treno d'onde superficiali del mare stando su una nave, dapprima ferma e poi in movimento, che si spostasse sia andando incontro alle onde, sia fuggendo dalle stesse navigando nella direzione opposta.

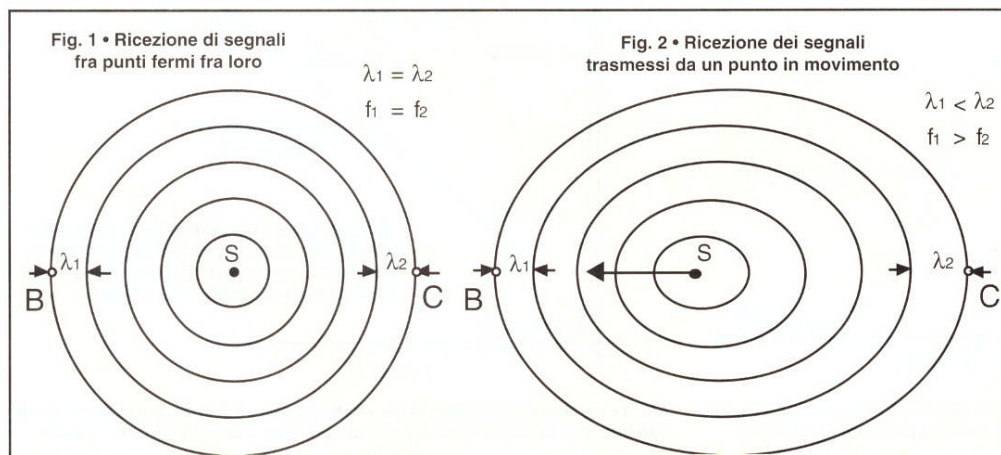
Cerchiamo di fare la stessa cosa anche noi, ma col satellite al posto della nave e con le onde elettromagnetiche al posto di quelle del mare perché i concetti non cambiano.

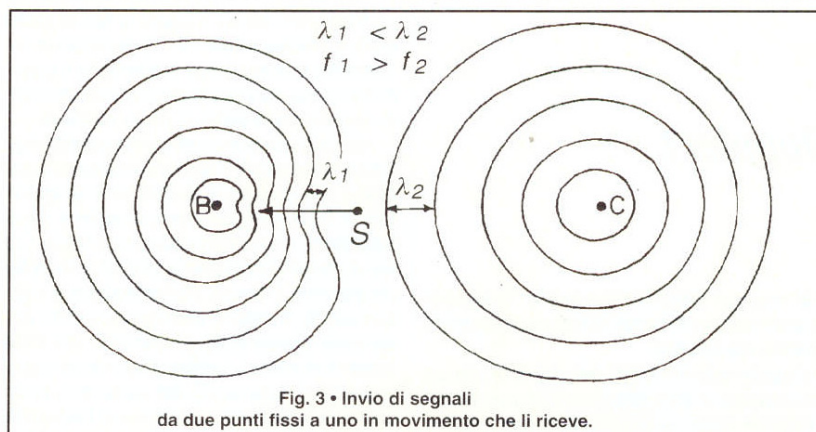
Ricezione di segnali fra punti fermi fra loro

Supponiamo di avere un beacon (fig. 1) che, stando fermo su una collina, si trovi in

(S) e che due osservatori, pure fermi, si trovino uno in (B) e l'altro in (C).

Abbiamo disegnato le onde elettromagnetiche emesse dal beacon nel classico modo, con tanti cerchi concentrici, dove la distanza fra due cerchi o creste, espressa in metri, rappresenta la lunghezza d'onda, ossia la distanza in metri che uno stesso punto dell'onda percorre durante il tempo di un periodo, propagandosi alla velocità della luce.





Siccome il beacon e gli osservatori sono fermi, si trovano nella condizione classica in cui noi operiamo a terra e se il beacon (S) trasmette a 145,812 MHz, entrambi gli osservatori lo riceveranno, come sappiamo, su questa frequenza.

Ricezione dei segnali da un punto in movimento

Supponiamo ora che il beacon (S) si trovi a bordo di un satellite in orbita circolare bassa (orbita LEO, Low Earth Orbit) **fig. 2** e che la velocità del satellite sia circa costante di 8 km/sec.

Supponiamo anche che il satellite col beacon (S) si diriga verso l'osservatore (B), allontanandosi da quello in (C).

La velocità del satellite, pur essendo piccola rispetto a quella di propagazione delle onde elettromagnetiche, è tuttavia una apprezzabile percentuale di questa, e 8 km/sec rappresentano lo 0,00266 % di 300.000 km/sec.

Possiamo quindi affermare che il satellite, mentre emette onde elettromagnetiche come in **fig. 2**, rincorre le sue stesse onde dirigendosi verso (B) e si allontana dalle sue stesse onde allontanandosi da (C).

Come conseguenza del fatto che (S) rincorre (B), la distanza fra due creste successive dell'onda nello spazio compreso fra (S) e (B) sarà più piccola che in **fig. 1**.

Per lo stesso motivo, giacché (S) si allontana da (C), la distanza fra due creste successive dell'onda nello spazio compreso fra (S) e (C) sarà più grande che in **fig. 1**.

La **fig. 2** evidenzia, seppure in modo esagerato, questo effetto scoperto da Doppler che, come detto, lo aveva intuito mettendo in relazione le onde del mare con il moto della nave. Come conseguenza, anche se la frequenza del beacon a bordo del satellite non cambia, nello stesso istante però l'osservatore in (B) riceve un'onda più corta di quella emessa dal beacon e quello in (C) riceve un'onda più lunga.

Siccome sappiamo che ad onda più corta corrisponde frequenza più alta e che ad onda più lunga corrisponde frequenza più bassa, ne consegue che l'osservatore in (B), che vede il satellite in avvicinamento riceverà il beacon su frequenza più alta di quella che effettivamente emette. Viceversa, l'osservatore in (C), che vede il satellite allontanarsi, riceverà il beacon su frequenza più bassa di quella effettivamente irradiata.

La stessa cosa succede quando si invertono i ruoli, ossia quando le stazioni (B) e (C) sono loro che trasmettono i segnali verso il satellite che però se li vede arrivare da terra, mentre esso è in movimento.

Come si vede da **fig. 3**, se consideriamo che il satellite (S) conservi lo stesso senso di moto di **fig. 2**, avvicinandosi cioè a (B) ed allontanandosi da (C), possiamo anche affermare che il satellite diventa l'osservatore che corre incontro alle onde che gli manda la stazione (B) comprimendone le creste mentre si allontana da quelle che gli manda la stazione (C) dilatandole.

E' evidente che, per analogia a quanto già detto, il satellite (S) avvicinandosi alla stazione (B) riceverà da questa un segnale a frequenza più alta di quella che (B) trasmette. Viceversa il satellite, allontanandosi dalla stazione (C), riceverà da questa un segnale a frequenza più bassa di quella che (C) trasmette effettivamente.

Il grafico dell'effetto Doppler

Ritorniamo ora al caso di **fig. 2** e poniamoci in (B) per ricevere il segnale del satellite (S) dal momento in cui sorge (Acquisition Of Signal o AOS) e si avvicina passando per l'istante di massimo avvicinamento o TCA (Time of Closest Approach) e continuiamo a misurare la variazione di frequenza fino ad arrivare al tramonto, in cui l'allontanamento è il massimo o LOS (Lost Of Signal).

Se riportiamo nel diagramma di **fig. 4** le variazioni di frequenza del beacon si vede subito che queste hanno un andamento periodico in cui cioè, al sorgere (AOS), la frequenza ricevuta è più alta di quella trasmessa dal beacon.

La frequenza è identica a quella del beacon nell'istante (TCA) di massimo avvicinamento, quando cioè, un istante infinitesimo dopo, comincerà l'allontanamento e la frequenza si abbassa per raggiungere il minimo al tramonto (LOS).

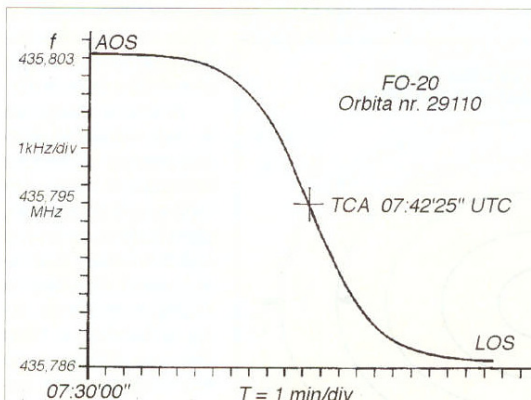


Fig. 4 • Variazione di frequenza per effetto Doppler sui segnali trasmessi da un satellite in orbita circolare tipo FO-20.

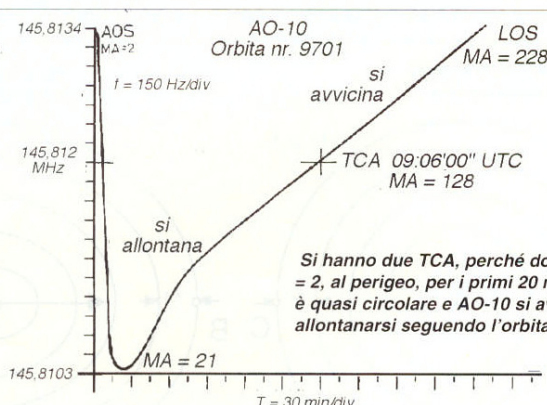


Fig. 5 • Variazione di frequenza per effetto Doppler sui segnali trasmessi da un satellite in orbita ellittica ad elevata eccentricità (Molnya) tipo AO-10 e 13.

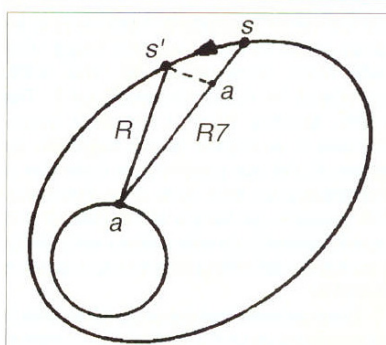


Fig. 6 • Ci troviamo in (a) e il satellite in avvicinamento orbita da (s) a (s'). R7-R fornisce l'avvicinamento in chilometri nel tempo T occorrente a percorrere l'arco (s-s') dell'orbita da (s) a (s'). La velocità media di avvicinamento è $V = (s-s')/T$. Siccome la velocità del satellite non è costante, ma varia con la seconda legge di Keplero, la velocità media fornisce un calcolo del Doppler approssimato che è tanto più preciso quanto minore è l'intervallo di tempo T a cui il PC calcola R7 ed R. La precisione è massima per $T = 1$ sec. Per i nostri scopi, $T = 60$ sec è sufficiente. Siccome $R7 - R$ è positivo, la frequenza aumenta per effetto Doppler.

E' evidente che, se conosciamo esattamente la frequenza del beacon a bordo del satellite, possiamo misurarla a terra e nel momento in cui questa corrisponde esattamente a quella generata sul satellite, ci troviamo alla minima distanza da questo, ossia al TCA, e ciò non è poco.

Misura analoga permette ai Doppler Radar del NORAD di creare gli elementi kepleriani dei satelliti, ma non è tutto...

Tra gli anni 1912 e 1929 gli astronomi Slipher e Hubble ricevono la luce delle stelle, la scompongono nello spettro, si accorgono che la frequenza del rosso, che è la più bassa nel visibile, è in diminuzione rispetto alla frequenza nominale e scoprono che le stelle si allontanano e che l'universo è in espansione.

Doppler in orbita LEO ed orbita Molnya

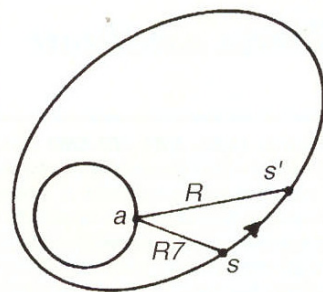
La variazione di frequenza per effetto Doppler è diversa per satelliti in orbita circolare (LEO) - tipo RS, AO-20, Microsat - da quelli in orbita "Molnya" (ossia ellittica ad elevata eccentricità, tipo AO-10 e 13).

Il satellite in orbita circolare, dal momento in cui sorge (AOS) e fino al (TCA) o punto più vicino, è sempre in avvicinamento, dopo di che si allontana fino al tramonto (LOS).

Questo è il motivo per cui l'osservatore (B) di fig. 2 vede la frequenza del beacon che, dal sorgere al tramonto, si abbassa sempre con l'andamento del diagramma di fig. 4.

Per AO-10 e 13 invece l'andamento del Doppler è differente.

Fig. 7 • Come in fig. 6, ma col satellite in allontanamento. R7-R è negativo e perciò la frequenza diminuisce per effetto Doppler.



Quando il satellite sorge è sempre vicino, ma poi si allontana verso l'apogeo (MA=128), per cui l'osservatore (C) riceve il beacon su frequenza che fino a MA=128 si abbassa sempre.

Quando poi, da MA=128 fino al tramonto, il satellite si riavvicina alla Terra, la frequenza del beacon aumenta di nuovo.

Ciò è rilevabile dal PC che mostra la variazione in hertz dell'effetto Doppler sul beacon col segno meno nella fase di allontanamento, dal sorgere fino a MA=128 (apogeo) e poi col segno più nella fase di avvicinamento, dall'apogeo fino al tramonto (LOS). Il diagramma di fig. 4 viene quindi rovesciato e assume l'andamento tipico di fig. 5.

Ciò era necessario chiarire per quegli OM che, abituati ai satelliti in orbita circolare, passando su AO-10 e 13, vedono il Doppler che varia alla rovescia rispetto al tempo trascorso.

Il calcolo del Doppler

Ora che conosciamo il meccanismo, cerchiamo di mettere questi concetti in una formula che ci permetta di calcolare il Doppler in modo più scientifico, come fa il computer, tanto per intenderci.

Supponiamo che (fig. 6) la distanza R7, ossia il "range" fra la nostra stazione e AO-13 alle ore 10.00 UTC sia 42629 km a MA=147.

Il PC mostra pure che alle ore 1100 UTC a MA=170 la distanza R è diminuita a 40709 km. E' evidente che AO-13 si sta avvicinando a noi e dalle 10 UTC alle 11 UTC l'avvicinamento è stato di 42629 - 40709 = 1920 km.

Siccome il tempo trascorso è un'ora, saranno passati $60 \times 60 = 3600$ secondi.

Giacché la velocità è uguale a spazio/tempo e per un satellite si misura in km/sec, alle ore 1100 UTC la velocità media di avvicinamento sarà $1920/3600 = 0,5333$ km/sec.

Minore è l'intervallo di tempo, maggiore è la precisione, che è massima per $T = 1$ sec.

Se ora vogliamo conoscere la variazione di frequenza (dovuta all'effetto Doppler ed espressa in hertz) del beacon a 145,812 MHz alle ore 1100 UTC, basta moltiplicare la frequenza [Hz] del beacon per il rapporto fra la velocità di 0,5333 km/sec con cui il satellite si avvicina e quella della luce (che sappiamo essere pari a 299792 km/sec).

Questo rapporto può essere espresso indifferentemente in km/sec oppure in m/sec giacché trattandosi di un rapporto il suo valore resta costante e il risultato non cambia. La variazione di frequenza, che chiameremo (F9) e dovuta al Doppler sarà:

$$F9 = 145.812.000 \text{ Hz} \times (0,5333 / 299792) = 259 \text{ Hz}$$

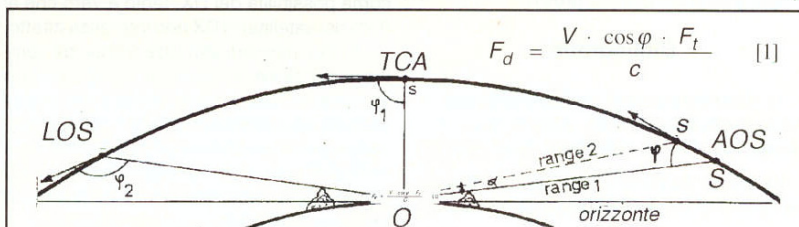


Fig. 8 • Il Doppler F_d si può calcolare anche con la formula generale nr. 1 di fig. 8 in cui V è la velocità del satellite (s) o dell'osservatore. ϕ è l'angolo compreso fra la direzione del moto di (s) e la congiungente fra osservatore e satellite; c è la velocità della luce. Ne consegue che $V \times \cos \phi$ è la velocità di avvicinamento o allontanamento. L'osservatore (O), quando l'elevazione del satellite supera la montagna, vede (s) al sorgere con $\phi < 90^\circ$, il $\cos \phi$ è positivo e F_d aumenta. Se ϕ fosse 0° , $\cos \phi = 1$, il mobile andrebbe incontro all'osservatore alla sua velocità propria come avviene per un proiettile. Al TCA $\phi = 90^\circ$ $\cos \phi = 0$ e così F_d è nullo. Al LOS, $\phi = 90^\circ$, $\cos \phi$ è negativo e F_d diminuisce. Per calcolare ϕ occorre risolvere un triangolo qualunque che ha per lati due "range" successivi 1 e 2 (possibilmente ravvicinati) e l'angolo di elevazione compreso. Si ritorna perciò nel procedimento generale di calcolo effettuato più semplicemente dal PC. Per ottenere risultati precisi occorre impostare nel programma di tracking intervalli di tempo il più breve possibile affinché la differenza fra due range risenta il meno possibile della variazione di velocità nell'arco di orbita interessato.

$$R9 = (R7 - R) / (AU * 60) : R7 = R : F9 = INT(F1 * 1E6 * (R9 / VL))$$

La riga in BASIC che determina il Doppler che IV3IBX e io scrivemmo nel 1985 nel programma che uso tuttora con devozione, perché riesco a leggerlo e capire, è quella riportata qui sopra.

In essa:

R9 = Differenza fra due range R7 e R [km];
AU = Intervallo di calcolo [minuti], relativo a R9;

F9 = Variazione [Hz] per Doppler;

F1 = Frequenza del beacon del satellite [MHz],
per il transponder il discorso è diverso e vedremo perché;

VL = Velocità della luce = 2,997925 E5 [km/sec].

E' evidente che (fig. 6) se il satellite si avvicina al nostro QTH allora (R7-R) è positivo e la frequenza aumenta per Doppler. Se (R7 - R) è negativo come in fig. 6a, il satellite si allontana da noi e la frequenza si abbassa.

Siccome poi il programma aggiorna continuamente R7 ponendolo uguale al range successivo R facendo l'operazione (R7 = R), ne consegue che appena si accende il computer, il programma calcola R, ma non può conoscere il precedente R7 perché era spento.

Siccome all'accensione del PC, nella locazione di memoria della variabile R7 ci può essere qualunque numero, ecco svelato il mistero del perché tutti i programmi sbagliano il Doppler sul primo orario calcolato.

Semplice no? E' ora auspicabile che il classico WUM-WUM che accompagna le emissioni SSB di AO-13 non venga più chiamato Doppler ma Spin-Modulation di cui ci si propone di parlare al più presto.

Bibliografia

1) "Satellite tracking" by Stanley Macko, A Rider Publication N°289, John F. Rider Publisher, Inc., 116 W. 14th Street, New York 11.

2) "Radio Astronomy" by John D. Kraus, McGraw-Hill Book Company Cat. N° 35392.

3) "Oscar Amateur Radio Satellites" by Stratis Caramanolis, distributed by RSGB - 35 Doughty Street, London, WC1N 2AE, England.

4) "Determination of Satellite Orbital Data by Doppler Shift Measurements", by P.L. Stride G2BUY, Oscar News nr. 36 - Winter '81.

5) "Simple automatic Doppler Shift Control for JAS-1" — by N. Guilford — Oscar News nr. 61, Sept. 1986.

6) "Introduction to Radar Systems" by Merrill I. Skolnik, McGraw-Hill Book Company, Inc 330 West 42nd Street, New York 36, NY - Cat. nr. 57905. Library of Congress - Catalog Card nr. 61-17675.

Posta satellitare

Giovanni Lupo, SWL IT9-3968 scrive che è in attesa di licenza speciale, ma fra non molto prenderà quella ordinaria. E' appassionato del DX e pensa di farlo via satellite in VHF e superiori. Chiede se esistono libri sui satelliti per chi comincia giacché attraverso RR ha capito ben poco. Vorrebbe conoscere qualcuno della zona che si occupa di satelliti, avere qualche consiglio per cominciare, quali apparecchiature, antenne, rotori e cavi usare, quali satelliti utilizzare con attrezzature economiche. Infine desidera sapere se con licenza speciale può usare gli RS con downlink a 29 MHz e soprattutto cosa fare per riuscire nel DX via satellite.

Il traffico via satellite è una delle tecniche avanzate e secondo me bisogna affrontarla dopo essere passati per tutte le esperienze VHF-UHF del traffico via tropo e, meglio ancora, se attraverso quelle formative in HF.

Non è possibile saltare a piè pari da SWL ai satelliti solo perché questi permettono di fare il DX in VHF-UHF. Rinunciare alle HF e al traffico tropo sarebbe come arrivare sul satellite senza conoscere né le lingue, né i trucchi del DX, il CW e l'autocostruzione oppure passare da giovani a vecchi in un giorno solo: è impossibile. Il satellite va visto soprattutto come mezzo di studio e non come possibilità del DX, tanto è vero che al 95% dei satellitari il DX non interessa affatto.

Potrei mandarti una lista di cose da comprare per aiutarti a diventare un operativo in modo facile, ma non ricaveresti molte soddisfazioni. Molti satellitari che non sono passati per esperienze HF e per la sperimentazione in VHF-UHF, che non conoscono le lingue per conversare di argomenti tecnici, né argomenti tecnici su cui discutere, sono in difficoltà.

Parte di questi reagisce e supera l'impatto, parte si pente e corre a bagnarsi i panni nell'Arno.

Vista però la grande passione che ti anima, tanto per cominciare usa le VHF e superiori e fatti le basi solo in CW ed SSB via tropo evitando la FM. Quando avrai la licenza ordinaria passa almeno qualche anno in HF. Considera le VHF e superiori essenzialmente una palestra di sperimentazione per antenne e piccole apparecchiature autocostruite come convertitori e transverter in kit con lo scopo di verificare i risultati di quanto studi sui libri. Usa la FM solo per comunicare di queste cose con altri che la pensano come te, diversamente togli la manopola FM dal

tuo tranceiver. Soprattutto leggi molto in inglese anche se non lo conosci. Leggi i libri della ARRL cominciando dal "The ARRL Handbook for Radio Amateur" ed il "The ARRL Antenna Book". L'inglese è fondamentale e si impara anche leggendo da ignoranti, ma con passione, le cose che ci interessano col solo aiuto di un dizionario. Col passare del tempo le risposte ai tuoi quesiti verranno da sole e allora sarà giunto il momento dell'ultima spiaggia sui satelliti e sull'EME.

Diversamente cominciando dai satelliti si otterrebbero gli stessi risultati che io otterrei correndo i 100 metri ad ostacoli, essendo abituato da anni a stare dietro una scrivania. Abbi fede: gli RS usali pure se vuoi.

Fabrizio Colarieti di Rieti legge RR e cerca il progetto di una parabola per 23cm con illuminatore elicoidale del tipo descritto su RR 12/95.

Su Oscar News nr. 81 del febbraio 1990 è stato pubblicato un articolo di ON6UG con tutti i dati per la costruzione di una parabola da due metri con tre illuminatori elicoidali concentrici per 70cm, 23cm e 13cm.

Trattandosi di parabola con centine di alluminio e riflettore in rete, la costruzione è facile. Ho fatto moltissimi QSO con ON6UG che usava questa parabola su Oscar-13 nei modi B-L ed S. Ti ho inviato le fotocopie, ma consiglio a chi si interessa di satelliti di iscriversi all'AMSAT-UK inviando 17,1 sterline al segretario R.J. Broadbent G3AAJ, 94 Herongate Road Wanstead Park, London E12 5EQ. Oltre a divenire soci si ricevono sei numeri all'anno della prestigiosa rivista tecnico-informativa Oscar-News, che vanta ormai vent'anni di vita. Buon lavoro.

L'amico **Mario I3EIE di Lonigo** (Vicenza) mi invia documentazione tecnica del famoso "Super-Positioner, Bi-Axial-Antenna - Rotor" della EGIS, con 90° di elevazione e 360° di azimuth, fino a parabole di 2,5 m e risoluzione di 0,01°.

Il rotore è adatto per satelliti Oscar in orbita Molnya come Oscar-13 con adatto software fornito col sistema. Il rotore è adatto anche per posizionare strumenti di ricerca astronomica. I prezzi sono altrettanto astronomici, ma comunque l'oggetto c'è ed è disponibile scrivendo alla EGIS Equipment-Gesellschaft für Intern. Elektronik Systeme GmbH; Flutstr. 34-36 D-6050 — Offenbach/Main. Tel. 0049-69-858327; Fax 0049-69-857863. I3EIE usa con successo questo sistema su satelliti meteorologici in banda 1700 MHz, che trasmettono ad alta risoluzione da orbita LEO, nonché su Oscar-13 Modos a 2400 MHz con tracking automatico su parabola da 60 cm.

Grazie a I3EIE per le Info.