

Il Protocollo di Comunicazione JT65

Joe Taylor, K1JT

Sommario. JT65 è un protocollo digitale dedicato a comunicazioni radioamatoriali con segnali estremamente deboli. E' stato progettato per ottimizzare i collegamenti Terra-Luna-Terra (EME) nelle bande VHF, e rispetta le procedure e gli standard esistenti per questi QSO. JT65 include dei sistemi di correzione dell'errore che lo rendono molto efficace, anche quando i segnali sono troppo deboli per essere udibili. Questo documento riassume le specifiche tecniche di JT65 e racconta il retroscena riguardo a scopi e filosofia di progetto. Inoltre, fornisce alcuni dettagli sulla implementazione di JT65 in un programma per computer chiamato WSJT, assieme a misure della sensibilità risultante e del suo tasso di errore.

1. Introduzione

Circa ottant'anni fa l'arco ha lasciato il posto all'onda continua (CW). Abitudinariamente, il codice Morse internazionale con manipolazione on-off è stato fin da allora la scelta base per la maggioranza dell'attività radioamatoriale con segnali deboli. Il Morse è pratico, versatile, e facilmente codificato e decodificato dagli umani. La manipolazione On-off è banale da implementare, e la banda passante necessaria è piccola. La scelta è stata facile.

E' facile dimostrare, tuttavia, che ne la codifica ne la modulazione del CW è ottimale. Quando è importante ogni dB del rapporto segnale/disturbo, come avviene nei qso amatoriali via meteor-scatter ed EME, vi sono ottimi motivi per esplorare altre opzioni. I personal computer equipaggiati con scheda audio forniscono un'occasione d'oro per sperimentare l'ampia gamma di possibilità. Il programma WSJT^{1,2,3} ("Weak Signal communications, by K1JT") è il risultato del mio sforzo per introdurre un sistema di codifica e modulazione molto più efficiente nelle comunicazioni radioamatoriali con segnali deboli. Questo programma, abbastanza recente, è già ben conosciuto dalla maggioranza degli operatori VHF/UHF con segnali deboli, ed è usato regolarmente da molti di loro. Sulle bande VHF la stragrande maggioranza dei QSO meteor-scatter e circa metà dei QSO EME vengono ora fatti con l'aiuto di WSJT.

Questo documento descrive JT65, uno dei protocolli di comunicazione supportati da WSJT. JT65 è specificamente progettato per comunicare con segnali estremamente deboli quali quelli incontrati sul tragitto EME. Gli aspetti operazionali del programma sono descritti nel *Manuale Operativo di WSJT*⁴; qui ci occupiamo della descrizione tecnica completa del protocollo e diamo una descrizione generale dell'implementazione in WSJT.

¹ Vedi la WSJT Home Page a <http://pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT>.

² J. Taylor, K1JT, "WSJT: New Software for VHF Meteor-Scatter Communication," *QST* December 2001, pp. 36-41.

³ J. Taylor, K1JT, "JT44: New Digital Mode for Weak Signals," *QST* June 2002, pp. 81-82

⁴ La *WSJT 4.7 User's Guide* è disponibile a http://pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/WSJT_User_470.pdf.

I moderni sistemi di comunicazioni digitali sono basati sulla matematica della teoria dell'informazione. Questo campo ha avuto origine nel 1948 con due classiche pubblicazioni⁵ in cui Claude Shannon dimostrò che l'informazione può essere trasmessa in un canale rumoroso con un tasso di errore arbitrariamente basso ed una velocità di trasmissione dipendente solo dalla larghezza di banda e dal rapporto segnale/disturbo (SNR). Ottenere un tasso di errori basso a bassissimi SNR richiede la codifica dell'informazione in una forma compatta ma tuttavia includente ridondanze accuratamente strutturate. La compattezza è necessaria per minimizzare la potenza di trasmissione e massimizzare la velocità; la ridondanza è necessaria per assicurare l'integrità del messaggio in un canale rumoroso e variabile.

Per essere trasmesso via radio, bisogna sovrapporre il messaggio codificato sulla portante usando qualche forma di modulazione. Le possibilità sono infinite: l'informazione può essere trasmessa variando ampiezza, frequenza, o fase di una portante, od una loro combinazione. I sistemi comunemente usati di modulazione digitale includono la manipolazione on-off (caso limite della modulazione di ampiezza), manipolazione di fase (PSK), e manipolazione di frequenza (FSK). Il protocollo di JT65 usa una manipolazione di frequenza con 65 toni, e forma d'onda di ampiezza costante e senza discontinuità di fase. Questo tipo di modulazione è molto più efficiente della manipolazione on-off, specialmente quando associata ad un sistema di codifica ottimale. Inoltre, è molto più tollerante di instabilità di frequenza del PSK (phase-shift keying).

La Sezione §2 del documento inizia con alcuni dati di base che hanno ispirato la filosofia di progetto di JT65, e la Sezione §3 presenta una descrizione ad alto livello del progetto complessivo. Il protocollo è definito in §4–8 e nell'Appendice A, mentre le Sezioni §9–12 descrivono la ricezione e decodifica di un segnale JT65. La specifica del protocollo definisce completamente la trasformazione di un messaggio valido JT65 nella forma d'onda di trasmissione, e fornisce tutte le informazioni necessarie per decodificare il segnale JT65 ricevuto. Includo i dettagli essenziali di come queste operazioni vengono eseguite in WSJT. Sono possibili anche differenti implementazioni di JT65, ed in particolare degli algoritmi usati in ricezione. Spero che questo documento incentivi altri a tentare questo compito, e che questi sforzi portino ad ulteriori progressi nelle caratteristiche e funzionalità di questo modo.

2. QSO EME: Requisiti e Procedure

La radio amatoriale è un'attività di puro divertimento, e, per molti, il divertimento ha sempre incluso mete quali far contatti con tutti i continenti, tutti gli stati USA, e quante più entità DXCC possibili. Queste mete sono particolarmente difficili via EME — e pertanto, per molti, particolarmente competitive e desiderabili. Affinché chiunque possa capire e fare questo gioco, è necessario concordare alcune regole base.

Quando i segnali sono ragionevolmente forti e la comunicazione tra operatori esperti avviene senza errori, è facile giudicare se si è trattato di un QSO valido. Quando sulle bande HF compare una stazione rara, i rapidissimi QSO fatti nel pile-up generalmente si svolgono così:

⁵ Shannon, C. E., "A Mathematical Theory of Communication," *Bell System Tech. J.*, **27**, pp. 379–423 and 623–656, 1948.

- | | | |
|----|----------|--------|
| 1. | CQ HC8N | |
| 2. | | K1JT |
| 3. | K1JT 599 | |
| 4. | | 599 TU |
| 5. | 73 HC8N | |

In questo esempio K1JT non invia mai il nominativo della stazione che sta collegando, perché la situazione ha reso questa informazione implicita e scontata. I segnali possono non essere “S9” da entrambi, ma non importa a nessuno. Quando lo scambio ha avuto luogo, entrambe le stazioni inseriscono con fiducia il QSO nei loro log, e possono successivamente scambiarsi le QSL a conferma che il contatto ha avuto luogo.

Nel mondo VHF/UHF, ed in particolare nell’EME, i segnali sono spesso molto deboli ed anche tra operatori molto esperti la comunicazione è tutt’altro che senza errori. Ne consegue che si debbano adottare degli standard più rigorosi per un QSO minimo ma legittimo. Da lungo tempo si considera che un contatto è valido quando ogni stazione ha copiato sia entrambi i nominativi che un rapporto, od altra informazione simile, ed una conferma esplicita che tutte queste informazioni sono state ricevute. Queste linee guida si applicano e funzionano bene per tutti i tipi di QSO con segnali deboli, sia via tropo, meteor scatter, EME, o altri modi di propagazione, e con tutti i tipi di equipaggiamenti e metodi di comunicazione.

Seguendo fedelmente queste linee guida, il minimo QSO EME di uno smalzato operatore VHF procede generalmente circa così:

- | | | |
|----|---------------------|-----------------|
| 1. | CQ SV1BTR ... | |
| 2. | | SV1BTR K1JT ... |
| 3. | K1JT SV1BTR OOO ... | |
| 4. | | RO ... |
| 5. | RRR ... | |
| 6. | | 73 ... |

Per un QSO su sked ad un’ora ed una frequenza prefissata, la trasmissione #1 è ovviamente inutile. I puntini (...) indicano ripetizioni dei messaggi, prassi praticamente sempre seguita nei contatti via EME per massimizzare le probabilità di successo. Il messaggio “OOO” è una notazione sintetica che rappresenta un rapporto. Il suo significato prestabilito è “i tuoi segnali sono leggibili almeno parte del tempo, ed ho copiato entrambi i nostri nominativi.” Analogamente, “RO” è un messaggio sintetico con significato sia di rapporto che di conferma. Significa “Ho copiato entrambi i nominativi, ed il rapporto mio e tuo è O”. Quando K1JT riceve la conferma “RRR” inviata da SV1BTR, il QSO è completo; ma poiché SV1BTR non lo sa ancora, è abitudine inviare “73” o qualche altra forma di fine_del_qso col significato “abbiamo completato.”

Messaggi radio sintetici hanno avuto un largo impiego sin dai tempi dell’arco e della telegrafia su fili; il codice Q è un’altra forma universalmente conosciuta. Sono dei semplici casi di ciò che in teoria della comunicazione è chiamato “codifica della sorgente” dei messaggi. La scelta di “OOO...” (sequenze ripetute di tre periodi con portante on, separati da brevi spazi, con uno spazio più lungo ogni tre) quale segnale che rappresenta un esplicito rapporto è stata fatta da operatori CW saggi ed esperti che sapevano che con segnali estremamente deboli, le linee erano più facili da copiare che i punti.

3. Progetto del sistema

Figura 1 rappresenta il diagramma di flusso di un sistema moderno di comunicazione digitale. Per massima efficienza con bassi rapporti segnale/disturbo, il messaggio dell'utente è codificato in forma compatta con minima ridondanza. Vengono poi aggiunte delle ridondanze definite matematicamente che consentono il recupero integrale del messaggio anche se alcune parti risultano degradate da rumore o perdita di segnale. Questo processo viene chiamato "forward error correction," o FEC. Il messaggio codificato, inclusa l'informazione per la correzione dell'errore, modula una portante. Il segnale radio risultante si propaga su un canale che lo attenua, per esempio di 250 dB o più per il tragitto EME, e ci aggiunge rumore e variazioni di ampiezza, frequenza e fase. In ricezione il segnale viene rivelato e decodificato, ed i risultati vengono presentati all'utente.

Eccetto che per le aggiunte a scopo correzione dell'errore, il diagramma di flusso di Figura 1 descrive sia le tradizionali comunicazione in CW che le moderne tecniche digitali. Esaminando il QSO CW EME della pagina precedente, la codifica della sorgente comprime il messaggio "SV1BTR, questo è K1JT, ho copiato entrambi i nostri nominativi" nella forma compatta "SV1BTR K1JT OOO". Per dare una possibilità di recupero dell'errore ed aumentare le probabilità che il messaggio venga copiato, un operatore CW ripete molte volte, nel periodo di trasmissione, il messaggio compresso. Per facilitare ancora più la copiatura, può formattare le ripetizioni in modo da trasmettere solo i nominativi per il primo 75% della trasmissione, seguito da ripetuti "OOO" per l'ultimo 25%. Si ritiene che l'operatore ricevente conosca queste convenzioni, e si regoli nell'ascolto. Tutte queste forme di codifica della sorgente sono utili: quanto più si conoscono le caratteristiche di un segnale debole, più è facile copiarlo. In condizioni estremamente marginali, gli operatori esperti cercano corrispondenze tra ciò che sentono e le componenti del messaggio che ragionevolmente si aspettano. Se la corrispondenza è buona, la copiatura viene considerata riuscita.

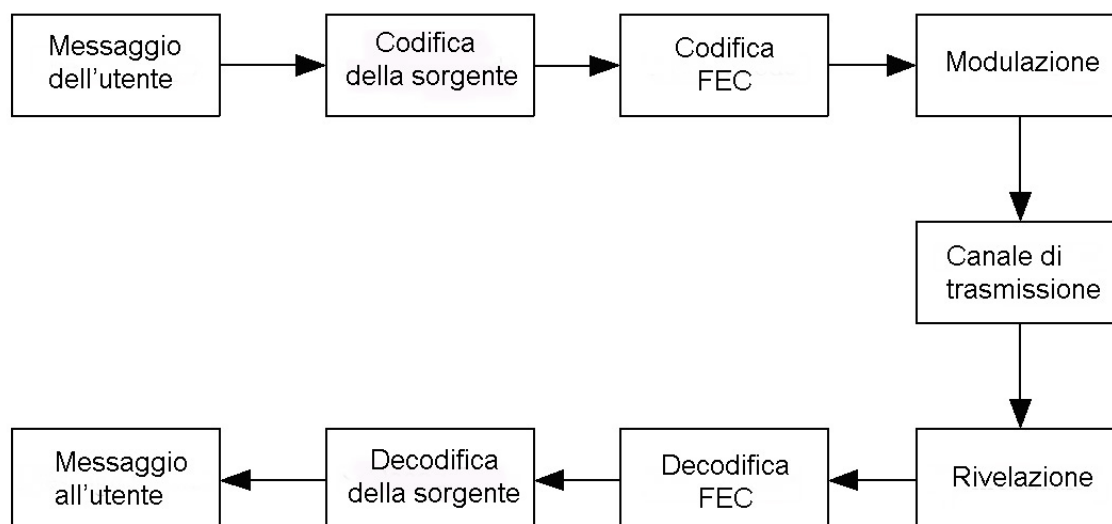


Fig. 1. – Diagramma di flusso dell'informazione in un sistema di comunicazione digitale.

4. JT65, Codifica della sorgente

JT65 usa tecniche esattamente analoghe, cominciando col rendere compatti ed efficienti i messaggi trasmessi. Come descritto nel *Manuale di WSJT 4.7*⁴, il messaggio standard “Tipo 1” di JT65 consiste di due nominativi, un locatore, ed un rapporto opzionale — una forma ampliata dei messaggi 2 e 3 nell’esempio di QSO tra SV1BTR e K1JT. La codifica della sorgente conosce le regole di come sono costituiti i nominativi, ed usa questa informazione per minimizzare il numero di bit di informazione necessari. Un nominativo consiste di un prefisso con uno o due caratteri, almeno uno dei quali deve essere una lettera, seguito da un numero ed un suffisso di una a tre lettere. Con queste regole, il numero dei possibili nominativi è di $37 \times 36 \times 10 \times 27 \times 27 \times 27$, cioè un po’ più di 262 milioni. (I numeri 27 e 37 derivano dal fatto che nella prima e nelle ultime tre posizioni può mancare un carattere, o una lettera, o forse un numero). Poiché 2^{28} è maggiore di 268 milioni, 28 bit sono sufficienti per codificare in modo univoco qualunque nominativo standard. Analogamente, sulla terra il numero dei locatori Maidenhead a 4 cifre è $180 \times 180 = 32.400$, che è minore di $2^{15} = 32.768$; perciò in un messaggio un locatore necessita di 15 bit. Queste importanti idee per una efficiente codifica dei messaggi EME è stata proposta per la prima volta da Clark e Karn⁶ nel 1996.

La sorgente di ogni messaggio Tipo 1 può essere codificata con $28+28+15=71$ bit, più uno per il rapporto. Per confronto, l’invio del messaggio “SV1BTR K1JT OOO” in codice Morse richiede 170 bit (dove un bit è definito come il periodo di un punto), anche senza il locatore. Il messaggio di JT65 è molto più compatto del messaggio CW, ed invia una maggior quantità di informazione. In pratica, il protocollo di JT65 codifica i rapporti in altro modo ed usa invece il 72° bit per indicare che il messaggio contiene un testo arbitrario anziché nominativi e locatore. Con un alfabeto di 43 caratteri, la lunghezza massima di un testo qualunque è 13 (il maggior numero intero minore di $71 \log 2 / \log 43$). Entro questi limiti, JT65 può trasmettere e ricevere *qualunque* messaggio.

Come mostrato sopra, circa 6 milioni dei possibili valori binari di 28 bit non sono necessari per i nominativi. Alcuni di questi sono stati assegnati a particolari componenti del messaggio quali “CQ” e “QRZ”. CQ può essere seguito da un numero a tre cifre per indicare una frequenza di risposta desiderata. (Se K1JT è su una frequenza di chiamata, per esempio 144,120, e trasmette “CQ 113 K1JT FN20”, questo significa che ascolterà su 144,113 e risponderà lì ad eventuali risposte.) Un rapporto numerico nella forma “-NN” o “R-NN” può essere inviato al posto del locatore. Il numero NN deve essere compreso tra 01 e 30. Se necessario per obblighi di legge, si può aggiungere un prefisso di paese od un suffisso di portatile⁷ ad uno dei nominativi, quale ZA/PA2CHR o G4ABC/P. In questo caso, l’informazione aggiuntiva viene inviata al posto del locatore. Alcuni ulteriori dettagli della codifica si trovano nell’Appendice A, ed un elenco dei prefissi aggiuntivi ammessi e dei suffissi si trova nell’Appendice B.

⁶ Clark, T. W3IWI, e Karn, P., KA9Q, “EME 2000: Applying Modern Communications Technologies to Weak Signal Amateur Operations,” *Proc. Central States VHF Society*, 1996.

⁷ In WSJT, versioni 4.9.2 e precedenti, i prefissi e suffissi dei nominativi erano trattati in modo diverso.

5. FEC (Forward Error Correction)

Al messaggio JT65, dopo compressione in 72 bit, vengono aggiunti 306 bit di correzione degli errori. Il tasso di codifica FEC è perciò $r = 72/378 = 0,19$; analogamente si potrebbe dire che ogni messaggio è trasmesso con un “rapporto di ridondanza” pari a $378/72 = 5,25$. Con un buon codice di correzione degli errori, tuttavia, il comportamento risultante e la sensibilità sono molto superiori di quanto ottenibile con cinque ripetizioni del messaggio. L’alto livello di ridondanza significa che JT65 sopporta molto bene il QSB. Segnali intelligibili dal software per soli 10 a 15 s possono fornire lo stesso una copia esatta.

La sorgente di questo apparentemente misterioso “guadagno di codifica” è facile da capire. Con 72 bit il numero totale dei possibili messaggi è 2^{72} , un po’ più di $4,7 \times 10^{21}$. Il numero delle possibili configurazioni di 378 bit è un numero molto più grande, 2^{378} , più di 6×10^{113} . Con una corrispondenza uno_a_uno tra i messaggi dell’utente a 72 bit e le “parole in codice” a 378 bit, ossia sequenze univoche di 378 bit, è chiaro che solo una minima frazione delle sequenze disponibili viene usata dal codice. Le sequenze prescelte sono quelle che sono “quanto più possibile diverse tra loro” in senso rigorosamente matematico.

Tra i tanti codici con correzione dell’errore efficienti i più noti sono i codici Reed Solomon, usati per ottenere i bassissimi tassi di errore caratteristici dei moderni CD-ROM e degli “hard disk”. Per JT65 ho scelto il codice Reed Solomon RS(63,12), che codifica ogni messaggio utente a 72 bit in 63 “simboli di canale” da sei bit per la trasmissione. Ogni parola in questo codice differisce da ogni altra in almeno 52 posizioni — che, in sostanza, è il motivo della potenza di questo codice. Anche ad SNR molto bassi, è improbabile confondere tra loro sequenze distinte.

```
Messaggio #1: G3LTF DL9KR JO40
72 bit, in simboli da 6 bit: 61 37 30 28 9 27 61 58 26 3 49 16
Simboli di canale, incluso FEC:
14 16 9 18 4 60 41 18 22 63 43 5 30 13 15 9 25 35 50 21 0
36 17 42 33 35 39 22 25 39 46 3 47 39 55 23 61 25 58 47 16 38
39 17 2 36 4 56 5 16 15 55 18 41 7 26 51 17 18 49 10 13 24

Messaggio #2: G3LTE DL9KR JO40
72 bit, in simboli da 6 bit: 61 37 30 28 5 27 61 58 26 3 49 16
Simboli di canale, incluso FEC:
20 34 19 5 36 6 30 15 22 20 3 62 57 59 19 56 17 35 2 9 41
10 23 24 41 35 39 60 48 33 34 49 54 53 55 23 24 59 7 9 39 51
23 17 2 12 49 6 46 7 61 49 18 41 50 16 40 8 45 55 45 7 24

Messaggio #3: G3LTF DL9KR JO41
72 bit, in simboli da 6 bit: 61 37 30 28 9 27 61 58 26 3 49 17
Simboli di canale, incluso FEC:
47 27 46 50 58 26 38 24 22 3 14 54 10 58 36 23 63 35 41 56 53
62 11 49 14 35 39 60 40 44 15 45 7 44 55 23 12 49 39 11 18 36
26 17 2 8 60 44 37 5 48 44 18 41 32 63 4 49 55 57 37 13 25
```

Fig. 2. – Tre messaggi JT65 come appaiono all’utente; in formato 72bit, in 12 simboli da sei bit; e come sequenze potenziate FEC di 63×6 -bit simboli di canale. Questi sono pronti per la trasmissione mediante FSK a 64 toni, ogni valore del simbolo corrisponde ad un tono distinto.

Ad esempio, le sequenze codificate di tre messaggi quasi identici sono mostrate in Figura 2. La prima riga mostra la codifica a 72 bit della sorgente, espressa con dodici simboli da 6 bit. Leggendo da sinistra a destra, si nota che il quinto simbolo numerico cambia da 9 a 5 quando l'ultima lettera del primo nominativo cambia da F ad E. Nel terzo caso il simbolo cambia da 16 a 17 quando il locatore cambia da JO40 a JO41. Per il resto i tre messaggi sono identici. Invece, dopo la codifica FEC, le tre sequenze di simboli di canale appaiono essere quasi completamente differenti tra loro — così differenti che *non vi è praticamente alcuna possibilità che, se decodificabili, una versione degradata dal rumore di uno di questi messaggi possa essere scambiata per una delle altre*. Il messaggio utente completo ed esatto ha un'alta probabilità di essere ricevuto, anche se l'SNR è da 2 a 6 dB in una banda passante di 2,7 Hz (ossia -28 a -24 dB in 2500 Hz, la banda passante convenzionalmente usata in WSJT). Questa affermazione può essere dimostrata da misure esplicite del tasso di errore in funzione del SNR, e queste misure per JT65 sono riassunte in Appendice C.

6. Permutazione e Codifica Gray

Dopo codifica, l'ordine dei simboli di JT65 è permutato scrivendoli riga per riga in una matrice 7×9, e leggendoli colonna per colonna. Stavo studiando il FEC per la prima volta quando progettavo JT65, e credevo erroneamente che permutando l'ordine dei simboli avrebbe conferito al sistema una maggiore immunità a perdite di segnale. In effetti non è così; ma poiché i suoi effetti sono innocui, la procedura è stata conservata per mantenere la compatibilità di JT65 nelle successive versioni. I simboli permutati sono convertiti da binario a codice Gray, cosa che rende JT65 un po' più tollerante delle instabilità di frequenza.

7. Messaggi Sintetici

Come prima descritto per il CW, JT65 usa speciali formati di segnale per trasmettere alcuni messaggi molto usati in un modo robusto ed efficiente. Definisco tre di questi messaggi. Corrispondono esattamente alle trasmissioni 4, 5, e 6 nell'esempio di QSO CW tra SV1BTR e K1JT, "RO", "RRR", e "73". Invece di manipolare on ed off una portante monofrequenza con una sequenza di-daa-di, daa-daa-daa, ..., JT65 invia "RO" trasmettendo due toni alternantisi con frequenze specifiche e ritmo specifico. Queste forme d'onda sono facili da riconoscere e distinguere tra loro, come pure dai "normali" messaggi JT65. In effetti, come molti utenti hanno scoperto, i messaggi sintetici di JT65 sono facilmente decodificabili dall'operatore usando vista od udito, come pure dal computer.

8. Sincronizzazione e Modulazione

JT65 usa sequenze T/R di un minuto e richiede una precisa sincronizzazione di tempo e frequenza tra trasmettitore e ricevitore. Un tipico equipaggiamento radioamatoriale non può ottenerli con sufficiente precisione senza feedback, così un segnale JT65 deve trasportare la propria informazione di sincronizzazione. Un "vettore di sincronismo" pseudo random è perciò inframezzato con i bit dell'informazione codificata. Questo consente un'accurata calibrazione delle differenze di tempo e frequenza, definendo rigorosamente il quadro di lavoro del decodificatore. In aggiunta, consente il "mediare" delle successive trasmissioni cosicché la decodifica è possibile anche quando i segnali sono troppo deboli per ottenerla in una sola trasmissione. Il segnale di sincronismo è così importante che (eccetto per i messaggi sintetici) metà di ogni trasmissione è dedicata a questo.

Una trasmissione JT65 si divide in 126 intervalli di tempo contigui, ciascuno lungo 0,372 s (4096 campioni a 11025 campioni al secondo). In ciascun intervallo la forma d'onda è una sinusoidale di ampiezza costante ad una delle 65 frequenze predefinite, ed il cambiamento di frequenza tra intervalli è fatto con continuità di fase. Una trasmissione comincia nominalmente a $t = 1$ s dopo l'inizio di un minuto UTC e termina a $t = 47,8$ s. Il tono di sincronismo ha la frequenza di 1270,5 Hz ed è normalmente inviato in ciascun intervallo avente un "1" nella sequenza pseudo random mostrata in alto nella Figura 3. La sequenza ha la gradita proprietà matematica che la sua funzione normalizzata di autocorrelazione decade da 1 a circa 0 per tutti i ritardi non nulli. Di conseguenza, è un eccellente vettore di sincronizzazione.

L'informazione utente codificata è trasmessa durante i 63 intervalli non utilizzati per il tono di sincronismo. Ogni simbolo di canale genera un tono a frequenza $1270,5 + 2,6917(N+2)m$ Hz, dove N è il valore del simbolo, $0 \leq N \leq 63$, ed m assume i valori 1, 2, e 4 per i sottomoduli A, B, e C di JT65. Il rapporto "OOO" è inviato invertendo la posizione del sincronismo e dei dati nella sequenza pseudo random. Poichè i normali messaggi necessitano di una precisa sincronizzazione, essi possono iniziare solo all'inizio di un minuto UTC.

```

1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1,0,0,1,0,0,
0,1,1,1,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,
0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,
0,1,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,
1,1,1,1,1,1,1

```

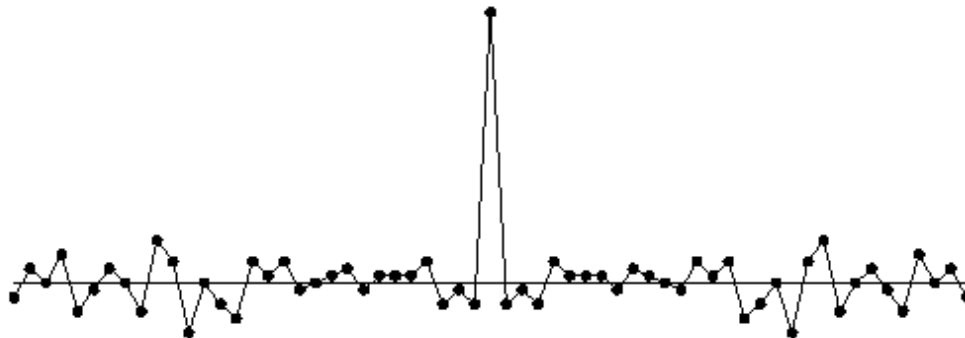


Fig. 3. – La sequenza pseudo random usata in JT65 come “vettore di sincronismo”, ed una rappresentazione grafica della sua funzione di autocorrelazione. L'isolato picco centrale di correlazione serve a sincronizzare tempo e frequenza tra stazioni trasmettenti e riceventi.

I messaggi sintetici fanno a meno del vettore di sincronismo ed usano intervalli di 1,486 s (16.384 campioni) per i toni alternanti. La frequenza minore è sempre 1270,5 Hz, la stessa del tono di sincronismo. La separazione in frequenza è $26,917 nm$ Hz con $n = 2, 3, 4$ per i messaggi RO, RRR, e 73. Al momento in cui i messaggi sintetici compaiono in un QSO, la differenza di frequenza tra trasmettitore e ricevitore già stata misurata con grande precisione. Di conseguenza, questi messaggi possono venire identificati con sicurezza dall'operatore come provenienti dalla stazione il cui nominativo è stato recentemente decodificato. Per i messaggi sintetici non è necessaria una precisa sincronizzazione, così possono venire iniziati in qualunque momento di una trasmissione. Ormai dovrebbe essere chiaro che JT65 non trasmette i messaggi carattere per carattere, come col Morse. Invece, interi messaggi sono trasformati in stringhe di 72 bit, e da queste in sequenze di 63 simboli da sei bit.

Questi simboli sono trasmessi tramite un canale radio; alcuni arrivano intatti, altri degradati dal rumore. Se un numero sufficiente di simboli è corretto (in senso probabilistico), l'intero messaggio compresso in 72 bit viene recuperato *esattamente*. I bit decodificati vengono quindi tradotti nel messaggio leggibile dall'uomo quale era stato inviato. Il tipo di codifica ed il potente FEC fan sì che i messaggi non vengano mai frammentati. Le componenti di un messaggio non possono venire confuse tra loro, ed i nominativi non sono mai mostrati con alcuni caratteri mancanti od errati. Non vi è la possibilità che le lettere O ed R di un nominativo possano venire confuse con un rapporto od una conferma, o che un frammento di nominativo come N8CQ od un locatore come EM73 siano interpretati erroneamente. Se la stazione con cui hai uno sked non si fa viva ed un'altra stazione ne prende il posto, non farete mai l'errore di pensare di avere lavorato la stazione dello sked.

9. Ricezione e Demodulazione

In WSJT, un segnale JT65 ricevuto viene analizzato usando una sequenza di ben note tecniche DSP. Il procedimento inizia con un segnale audio nella gamma di frequenza 0–3 kHz, digitalizzato nominalmente a 11.025 campioni al secondo. Il segnale digitale viene filtrato da un passa-basso e sottocampionato con fattore due. Viene calcolato lo spettro delle trasformate di Fourier di blocchi di 2.048 campioni e viene cercata la presenza della sequenza pseudo random di sincronismo. La rivelazione del picco di sincronismo rivela le differenze di tempo e frequenza, che possono essere causate da spostamenti Doppler e da ritardi del tragitto EME oltre che da errori della calibrazione in frequenza e della regolazione dell'orologio. La precisione di sincronismo è tipicamente 1,5 Hz in frequenza e 0,03 s in tempo. Una volta stabilito il sincronismo, il programma rimisura la frequenza del tono di sincronismo prendendo piccoli gruppi di intervalli e liscia i risultati, consentendo così il tracking e la compensazione di piccole derive in frequenza. Non è necessario controllare la fase tra simboli.

Conoscendo accuratamente il sincronismo, il programma calcola lo spettro con 64 "bin" per ciascuno dei 63 simboli di canale. Questi spettri hanno risoluzione $2,7m$ Hz (e.g., 5,4 Hz per il sottomodo JT65B, $m = 2$), e per segnali molto deboli hanno la forma del rumore. Molti toni non sono rivelabili al di sopra del rumore. In media, tuttavia, in ciascun intervallo dei toni, l'intervallo di frequenza (bin) che contiene il segnale avrà un'ampiezza maggiore degli altri. Usando le note proprietà statistiche del rumore casuale di tipo Gaussiano, WSJT calcola la probabilità che un simbolo sia stato trasmesso per ciascuno dei possibili valori. Questa informazione probabilistica, basata sullo spettro misurato dei simboli sincronizzati, è l'informazione base ricevuta. Dopo avere tolto la codifica Gray e le permutazioni dei simboli, le probabilità sono passate al decodificatore.

10. Decodificatore Reed Solomon

Anche con un codice a correzione d'errore, piccolo come RS(63,12), può essere molto difficile "invertire" ossia decodificare efficientemente. Il problema base è questo: dati gli spettri misurati di ciascuno dei 63 simboli di canale, esiste un'unica sequenza di 72 bit che può essere identificata con fiducia come messaggio dell'utente?

Teoricamente, si potrebbero codificare ciascuno dei 2^{72} possibili messaggi utente e correlare i risultati con gli spettri ricevuti, cercando la coincidenza. Questo approccio non è pratico.

Tuttavia: un semplice calcolo mostra che con un computer di oggi da 3 GHz, memoria illimitata, ed un programma molto efficiente, sarebbero necessari circa 200 milioni di anni per decodificare in questo modo un singolo messaggio.

I codici Reed Solomon sono economicamente importanti perchè esistono dei ben definiti algoritmi matematici per decodificarli. Gli algoritmi variano in complessità ed in quanto avvicinano la sensibilità ideale del metodo appena descritto. Dalla versione 4.5 del programma, WSJT ha usato un algoritmo che rappresenta lo stato dell'arte in fatto di decodifiche Reed Solomon. E' basato su una ricerca di Ralf Koetter ed Alexander Vardy⁸, ed usa codici avuti su licenza dalla loro ditta, CodeVector Technologies. Grazie alle informazioni probabilistiche "soft decision" sui valori dei simboli ricevuti, questo decodificatore da un chiaro risultato per ogni trasmissione analizzata. Con molta sicurezza, restituisce o i 72 bit del messaggio trasmesso o un segnale che indica "nessun risultato".

Il tasso di errore per i decodificatori di WSJT è stato accuratamente misurato in funzione del livello di segnale. I risultati sono riassunti nell'Appendice C. In breve, il decodificatore K-V mostra una ripida transizione da "decodifica quasi sempre" a "fallisce quasi sempre" man mano che il rapporto segnale/disturbo scende sotto -23 a -25 dB (per JT65B) nella scala di WSJT. Inoltre i risultati mostrano che con dati "puliti" (rumore Gaussiano additivo, e forse con evanescenza, ma senza interferenze da altri segnali), le decodifiche errate dell'algoritmo di decodifica K-V di RS(63,12) sono così rare che è improbabile ne vediate mai una.

11. Decodificatore a Ricerca Approfondita (Deep-Search)

Cosa succede se il decodificatore K-V non produce risultati? Si può fare qualcos'altro? La vita è troppo breve per pensare di correlare tutti i 2^{72} possibili messaggi cercando una coincidenza, ma il numero dei singoli messaggi trasmessi in veri QSO EME è in realtà molto più piccolo di 2^{72} , e quelli in cui siete interessati sono ancora meno. Se i messaggi più plausibili ed interessanti sono provati per primi — più o meno come si fa quando si copia del CW molto debole — e se l'algoritmo di ricerca smette se non trova coincidenze dopo un tempo ragionevole, l'approccio computazionale di forza bruta sopra descritto può essere pratico. In WSJT, una procedura che io chiamo algoritmo di "ricerca approfondita" tenta di fare proprio questo.

La ricerca approfondita inizia con un elenco di nominativi e locatori plausibili. Queste liste sono tenute da tempo, sia mentalmente che per iscritto, dalla maggioranza degli operatori EME. Possono essere di grande aiuto quando si cerca di capire quale stazione sta trasmettendo un debole CQ, o rispondendo al vostro CQ, o accodandosi al vostro ultimo QSO. Nel decodificatore a ricerca approfondita di WSJT, ogni voce dell'elenco viene accoppiata con "CQ" e col vostro nominativo, creando così dei messaggi ipotetici di prova. Se nell'elenco vi sono N_c nominativi, verranno generati circa $2N_c$ messaggi, completamente codificati, e verrà verificata la buona coincidenza dei simboli di canale con lo spettro osservato. Potete definire l'elenco dei possibili nominativi come meglio credete. Viene fornito con WSJT un file di esempio, che contiene i nominativi di circa 5000 stazioni mondiali note per essere attive in attività con segnali deboli sulle bande VHF/UHF.

⁸ Koetter, R., e Vardy, A., "Soft-Decision Algebraic Decoding of Reed Solomon Codes," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory*, p. 61, 2000.

Gli utenti accorti di JT65 mantengono il loro file, aggiungendo o cancellando nominativi come ritengono più opportuno.

In effetti, la vostra base dati di nominativi definisce un set di filtraggio, progettato su misura per la vostra stazione e predisposto per massima sensibilità a quel sottogruppo di messaggi che vi aspettate ragionevolmente di poter ricevere. La ricerca approfondita non tiene conto di messaggi con nominativi assenti dalla base dati, o con normale testo, o qualunque altra cosa eccetto "CQ" o il vostro nominativo nel primo campo del messaggio. Questi messaggi saranno decodificati con la notevole sensibilità dell'algoritmo K-V. Tuttavia, per ogni messaggio di questo sottogruppo, la ricerca approfondita fornisce circa 4 dB di sensibilità in più pur mantenendo un basso tasso di errore. Dovrebbe essere ovvio che questi 4 dB sono essenzialmente equivalenti al noto "guadagno in sked" che succede agli operatori CW quando copiano nominativi noti o fanno sked.

12. Decodifica dei Messaggi Sintetici

Oltre a cercare un tono di sincronismo modulato con l'attesa sequenza pseudo random, WSJT ricerca toni alternanti con la specifica modulazione dei messaggi sintetici di JT65. Le frequenze sono misurate e paragonate con quella del tono di sincronismo della trasmissione precedente, e viene verificato che la modulazione sia un'onda quadra. Se frequenza e modulazione concordano, e se l'ampiezza supera una soglia prefissata, viene dichiarata la rivelazione di un messaggio sintetico. Date le tolleranze di frequenza e tempo, può essere stabilita una soglia bassa pur mantenendo un basso tasso di messaggi errati. Le curve di sensibilità misurate per i messaggi sintetici sono mostrate in Appendice C, assieme a quelle dell'algoritmo K-V e del decodificatore a ricerca approfondita.

13. Responsabilità dell'Operatore e Correttezza dei Messaggi

QSO fatti con uno dei modi di WSJT, incluso JT65, richiedono un'attiva partecipazione dell'utente in tutte le sue fasi. In presenza di spurie, QRM, QRN, od altre anomalie quali distorsioni da tragitto multiplo, è necessario il coinvolgimento dell'operatore per evitare errori di interpretazione delle uscite del programma. La maggioranza degli operatori si accorge di acquisire facilmente l'abilità necessaria, dopo aver fatto alcuni contatti JT65.

Assieme alle linee guida per QSO validi descritte in Sezione 2, è utile citare una particolarità di JT65. I contatti fatti con WSJT sono inerentemente auto.documentanti. Quando un QSO JT65 è completato con successo, entrambi gli operatori *sanno* che è stata scambiata l'informazione prescritta. Inoltre, se desiderato, hanno i file .wav registrati per dimostrarlo. Questi file forniscono una "traccia di bit", una prova incorruttibile che chiunque può esaminare. Dopo QSO particolarmente interessanti o difficili, vengono spesso scambiate per e-mail immagini dello schermo e forme d'onda registrate. Ho accumulato un'ampia libreria di file .wav di JT65 dai miei QSO, e monitorando le bande, come pure molti inviati da altri. Questi file si sono dimostrati particolarmente utili per affinare gli algoritmi di WSJT per la massima sensibilità ed il minimo tasso di errore, in condizioni reali. Verranno fatti altri progressi in questi campi, negli anni a venire.

14. Esperienza in aria

La prima versione utilizzabile di JT65 è stata completata nel Novembre 2003. Le prime prove in aria con N3FZ hanno rapidamente confermato le mie aspettative che JT65 sarebbe

diventato un'arma importante nell'arsenale degli appassionati di VHF/UHF con segnali deboli. I vantaggi pratici di codici con correzione dell'errore per comunicazioni radioamatoriali a segnali deboli furono subito evidenti. Non meraviglia, mi sono reso conto, che la NASA trasmette sempre verso la Terra le fotografie dallo spazio profondo usando codifiche della sorgente e potente FEC. Nelle comunicazioni dallo spazio profondo, ogni dB di miglioramento della sensibilità può far risparmiare milioni di dollari che altrimenti dovrebbero essere spesi per antenne più grandi o maggior potenza di trasmissione.

La definizione del protocollo di JT65 ha avuto solo piccole evoluzioni dopo le prime trasmissioni di prova. Nel frattempo, sono costantemente migliorati i decodificatori, fornendo notevoli miglioramenti del comportamento in aria. Non ho modo di sapere quanti QSO EME sono stati fatti con JT65, ma si tratta sicuramente di tante migliaia. Gli utenti non hanno esitato ad informare di "bugs" del programma o di suggerire migliorie operazionali, e WSJT ha ricavato grande beneficio da questo feedback. E' nato un significativo nuovo gruppo di entusiasti dell'EME, attratti dal fatto che i QSO con JT65 possono venire fatti con stazioni molto più modeste di quelle necessarie con i metodi tradizionali. Centinaia di QSO EME JT65 sono stati fatti da stazioni che inviavano 150 W ad una singola yagi sulla banda dei 2 m, e QSO con "big guns" (stazioni potentissime) sono stati fatti con appena 5 W. Persino i QSO EME sui 50 MHz, a lungo considerati tra le imprese più difficili, sono diventati eventi normali.

15. Guardando Avanti

Non prevedo che vi sia la necessità di grosse revisioni od espansione della specifica tecnica di JT65. Tuttavia, ho in mente molti modi per migliorare l'implementazione di JT65. Per cominciare, i dati audio ricevuti dovrebbero venire processati mentre arrivano, piuttosto che in "modo batch" alla fine del periodo di ricezione. Questo permetterebbe di avere un display spettrale "real-time", e penso ad un'opzione che consenta la "decodifica precoce" dei segnali dopo che 20, 30 s di dati sono stati acquisiti. Ho imparato che alcune schede audio hanno errori della frequenza di campionamento che arrivano allo 0,6%. L'attuale decodificatore JT65 di WSJT non cerca di correggerli, e la sensibilità ne soffre inutilmente. Si può anche fare un miglior lavoro nella rivelazione e soppressione delle interferenze. L'algoritmo attualmente usato per seguire le derive in frequenza del segnale può essere migliorato. E' certamente desiderabile correggere esplicitamente le derive per effetto Doppler, specialmente a 432 e 1296 MHz. Sarebbe utile un controllo più preciso della temporizzazione delle sequenze di trasmissione/ricezione, dovrebbe essere possibile persino con Windows. La velocità delle procedure di decodifica può essere migliorata... e l'elenco prosegue. Forse altre persone si assumeranno la stimolante sfida di fare alcuni di questi miglioramenti, od ideare altri miglioramenti ancor più significativi.

Appendice A: Particolari della Codifica dei Messaggi

Come descritto nelle Sezioni §4–6, la codifica del messaggio JT65 si sviluppa in più stadi. Il messaggio dell'utente è dapprima “codificato dalla sorgente” in una forma compatta che richiede solamente 72 bit. I bit sono raggruppati in 12 simboli da 6 bit, ed il codificatore Reed Solomon aggiunge 51 simboli (da 6 bit) di parità. I 63 simboli di canale sono permutati, codificati Gray, e trasmessi usando un FSK (frequency shift keying) a 64 toni. Un vettore di sincronizzazione è inviato come 65^a frequenza, due intervalli di tono più in basso del più basso tono audio dei dati.

Alcune scelte arbitrarie forniscono ulteriori dettagli sul raggruppamento del messaggio e sul sequenziamento dei simboli di canale. Per facilitare ad altri l'implementazione del protocollo JT65, queste cose sono meglio descritte con l'effettivo codice sorgente. Sotto elencato vi è un programma Fortran che può essere facilmente compilato sotto Linux. Qui è elencato solo il programma principale; l'intero codice sorgente, incluse le necessarie subroutine ed un Linux makefile, possono essere scaricate da pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/JT65code.tgz.

Il programma compilato accetta un messaggio JT65 (tra parentesi nella riga di command) e restituisce un messaggio raggruppato ed i simboli di canale in forma di valori a 6 bit. Esempi delle uscite del programma sono state mostrate in Figura 3 e descritte in Sezione §5.

```
program JT65code
```

```
C Provides examples of message packing, bit and symbol ordering,  
C Reed Solomon encoding, and other necessary details of the JT65  
C protocol.
```

```
character*22 msg0,msg,decoded,cok*3  
integer dgen(12),sent(63)  
  
nargs=iargc()  
if(nargs.ne.1) then  
    print*,'Usage: JT65code "message"  
    go to 999  
endif  
  
call getarg(1,msg0) !Get message from command line  
msg=msg0  
  
call chkmsg(msg,cok,nspecial,flip) !See if it includes "OOO" report  
if(nspecial.gt.0) then !or is a shorthand message  
    write(*,1010)  
1010 format('Shorthand message.')
```

```
    go to 999  
endif  
  
call packmsg(msg,dgen) !Pack message into 72 bits  
write(*,1020) msg0  
1020 format('Message: ',a22) !Echo input message  
if(and(dgen(10),8).ne.0) write(*,1030) !Is the plain text bit set?  
1030 format('Plain text.')
```

```
write(*,1040) dgen  
1040 format('Packed message, 6-bit symbols: ',12i3) !Print packed symbols  
  
call packmsg(msg,dgen) !Pack user message  
call rs_init !Initialize RS encoder  
call rs_encode(dgen,sent) !RS encode  
call interleave63(sent,1) !Interleave channel symbols  
call graycode(sent,63,1) !Apply Gray code  
  
write(*,1050) sent  
1050 format('Channel symbols, including FEC:'/(i5,20i3))  
call unpackmsg(dgen,decoded) !Unpack the user message  
write(*,1060) decoded,cok  
1060 format('Decoded message: ',a22,2x,a3)  
  
999 end
```

Appendice B: Prefissi e Suffissi leciti di Nominativi

I prefissi e suffissi dei nominativi, accettati da JT65, sono elencati nel file `px.f` incluso nell'archivio del codice sorgente a pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/JT65code.tgz, come descritto in Appendice A. I suffissi accettati includono /P e /0 fino a /9, mentre l'intera lista dei prefissi è elencata qui sotto. Ulteriori prefissi e suffissi possono venire aggiunti in futuro alla lista. E' stato riservato lo spazio per 450 prefissi non accettando locatori entro 5° dal Polo Nord.

1A	1S	3A	3B6	3B8	3B9	3C	3C0	3D2	3D2C	3D2R	3DA	3V	3W	3X
3Y	3YB	3YP	4J	4L	4S	4U1I	4U1U	4W	4X	5A	5B	5H	5N	5R
5T	5U	5V	5W	5X	5Z	6W	6Y	7O	7P	7Q	7X	8P	8Q	8R
9A	9G	9H	9J	9K	9L	9M2	9M6	9N	9Q	9U	9V	9X	9Y	A2
A3	A4	A5	A6	A7	A9	AP	BS7	BV	BV9	BY	C2	C3	C5	C6
C9	CE	CE0X	CE0Y	CE0Z	CE9	CM	CN	CP	CT	CT3	CU	CX	CY0	CY9
D2	D4	D6	DL	DU	E3	E4	EA	EA6	EA8	EA9	EI	EK	EL	EP
ER	ES	ET	EU	EX	EY	EZ	F	FG	FH	FJ	FK	FKC	FM	FO
FOA	FOC	FOM	FP	FR	FRG	FRJ	FRT	FT5W	FT5X	FT5Z	FW	FY	M	MD
MI	MJ	MM	MU	MW	H4	H40	HA	HB	HB0	HC	HC8	HH	HI	HK
HK0A	HK0M	HL	HM	HP	HR	HS	HV	HZ	I	IS	IS0	J2	J3	J5
J6	J7	J8	JA	JDM	JDO	JT	JW	JX	JY	K	KG4	KH0	KH1	KH2
KH3	KH4	KH5	KH5K	KH6	KH7	KH8	KH9	KL	KP1	KP2	KP4	KP5	LA	LU
LX	LY	LZ	OA	OD	OE	OH	OH0	OJ0	OK	OM	ON	OX	OY	OZ
P2	P4	PA	PJ2	PJ7	PY	PY0F	PT0S	PY0T	PZ	R1F	R1M	S0	S2	S5
S7	S9	SM	SP	ST	SU	SV	SVA	SV5	SV9	T2	T30	T31	T32	T33
T5	T7	T8	T9	TA	TF	TG	TI	TI9	TJ	TK	TL	TN	TR	TT
TU	TY	TZ	UA	UA2	UA9	UK	UN	UR	V2	V3	V4	V5	V6	V7
V8	VE	VK	VK0H	VK0M	VK9C	VK9L	VK9M	VK9N	VK9W	VK9X	VP2E	VP2M	VP2V	VP5
VP6	VP6D	VP8	VP8G	VP8H	VP8O	VP8S	VP9	VQ9	VR	VU	VU4	VU7	XE	XF4
XT	XU	XW	XX9	XZ	YA	YB	YI	YJ	YK	YL	YN	YO	YS	YU
YV	YV0	Z2	Z3	ZA	ZB	ZC4	ZD7	ZD8	ZD9	ZF	ZK1N	ZK1S	ZK2	ZK3
ZL	ZL7	ZL8	ZL9	ZP	ZS	ZS8								

Appendice C: Sensibilità Misurata e Tasso di Errore

Il protocollo di JT65 può essere definito una volta per tutte, ma il comportamento in aria dipende da una particolare implementazione software del decodificatore. Come descritto in §9–12, la versione 4.9 di WSJT esegue la decodifica JT65 in tre fasi: un decodificatore Reed Solomon, il decodificatore a ricerca avanzata, ed il decodificatore per i messaggi sintetici. La Sezione §13 mette in evidenza che quando sono presenti spurie, scariche atmosferiche, od altre interferenze, l'interazione con l'operatore è una parte essenziale del processo di decodifica. L'operatore può abilitare una funzione "Zap" per sopprimere le spurie, una funzione "Clip" per sopprimere picchi di rumore a banda larga, e la funzione "Freeze" per limitare la gamma di frequenze in cui viene cercato il tono di sincronismo. Usando opportunamente questi aiuti ed i display grafici e numerici del programma, l'operatore è in grado di riconoscere e scartare ogni uscita spuria del decodificatore.

In condizioni normali in cui il canale di trasmissione è caratterizzato da semplice attenuazione, l'aggiunta di rumore bianco Gaussiano, e magari la moltiplicazione per un coefficiente di evanescenza "Rayleigh", si possono misurare accuratamente le sensibilità ed il tasso di errori dei decodificatori. Un simulatore software per fare questo è stato scritto per la piattaforma Linux come prima (ed essenziale) parte dello sviluppo di WSJT.

Il simulatore genera delle forme d'onda digitalizzate per ogni modo di WSJT e le inietta in rumore Gaussiano (a banda limitata) con un rapporto segnale/disturbo prefissato ed opzionalmente con evanescenza. I file audio risultanti possono venire salvati in formato WAV, poi aperti e decodificati in WSJT. Possono essere anche decodificati direttamente nel simulatore, usando un programma analogo al decodificatore WSJT ma compilato per Linux.

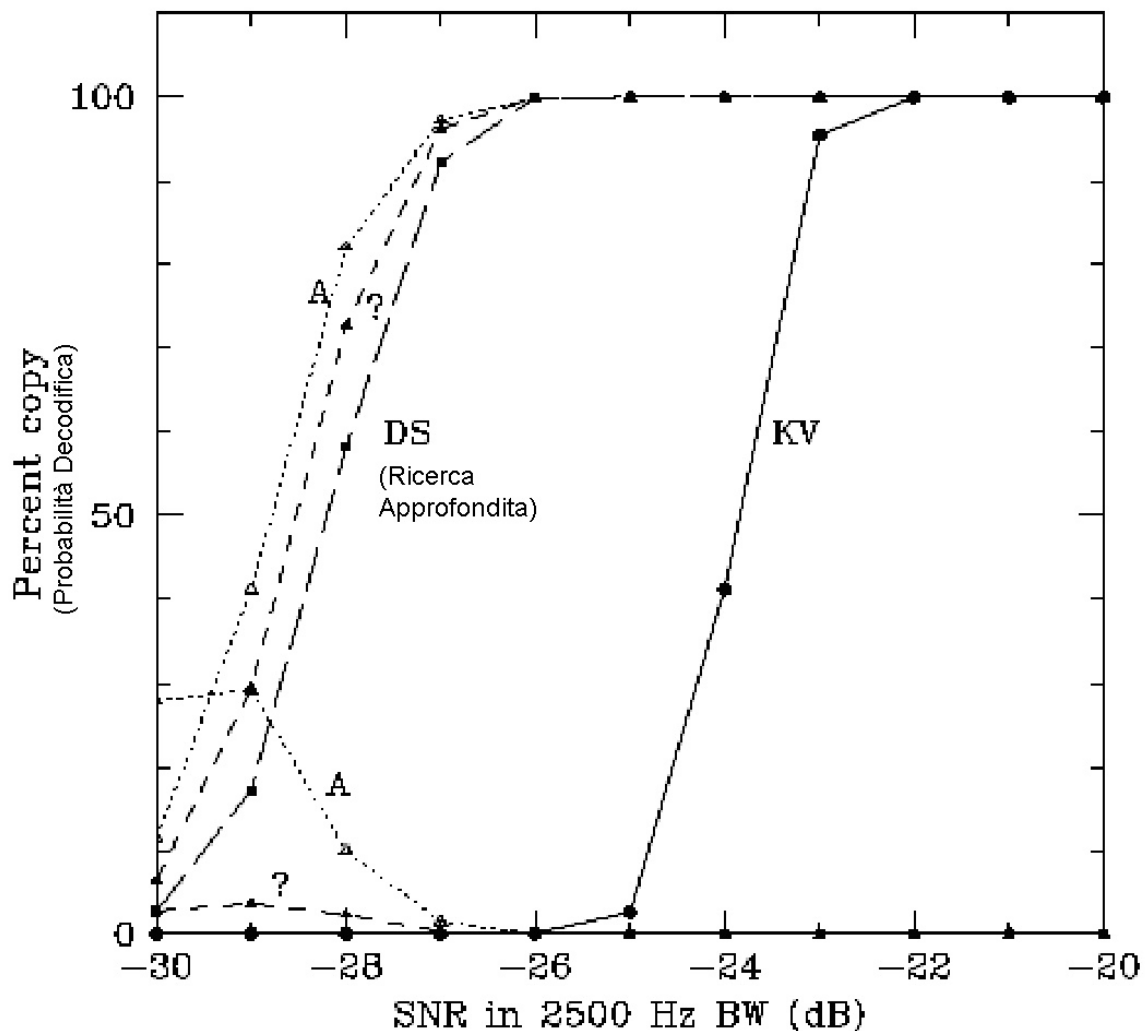


Fig. 4.— Probabilità misurate di decodifica in funzione del SNR per JT65B. La curva siglata KV si riferisce all’algoritmo Koetter-Vardy; DS alla Ricerca Approfondita. Il tasso di decodifiche erronee per l’algoritmo KV è troppo piccolo per essere misurabile; per la Ricerca Approfondita (DS) il tasso di “gravi errori” è circa 0,03%, troppo piccolo per il grafico. Le curve marcate “?” ed “A” in basso a sinistra danno il tasso di errore della Ricerca Approfondita per i messaggi marcati con “?” e quando “Aggressive decoding” è stato abilitato.

Centinaia di migliaia di trasmissioni JT65 simulate sono state provate in questo modo — prima per togliere i malfunzionamenti ed affinare i decodificatori, e poi per misurare la sensibilità ed il tasso di errore del programma finito. I risultati delle simulazioni sono riassunti nelle Figure 4 e 5. Per creare la Figura 4, sono state generate e provate 1000

trasmissioni simulate per ciascun livello SNR = -30, -29, ... -20 dB, usando messaggi standard JT65 consistenti di due nominativi ed un locatore. L'intero decodificatore WSJT (versione 4.9.5) ha lavorato su ciascuna delle 11.000 trasmissioni simulate. I cerchi neri e la curva a tratto continuo di Figura 4 mostra i risultati del decodificatore Koetter-Vardy. La conclusione finale è che 96% delle trasmissioni è stato decodificato correttamente a -23 dB, 41% a -24 dB, e 3% a -25 dB. Il decodificatore KV non ha prodotto false decodifiche in nessuna di queste prove.

Per la Ricerca Approfondita, i quadratini neri e la curva a tratti mostrano che 92% delle trasmissioni è stata decodificata correttamente a -27 dB, 58% a -28 dB, e 17% a -29 dB. Tre "gravi errori" (decodifiche errate senza ?) si sono verificati nelle 11.000 trasmissioni simulate, per un tasso totale di errore di $2,7 \times 10^{-4}$ (troppo piccolo per essere visibile in Fig. 4). Se si includono i messaggi decodificati e marcati ?, il numero di decodifiche corrette aumenta a 96%, 73%, e 29% ai livelli -27, -28, e -29 dB (curva a trattini e triangolini neri). Il tasso di errore, rappresentato dalla curva a trattini in basso a sinistra di Figura 4, raggiunge un massimo di 3,6% a -29 dB. Con abilitata l'opzione di WSJT "Aggressive decoding", le percentuali di copia corretta salgono a 97%, 82%, e 41%, a -27, -28, e -29 dB (curva punteggiata e triangoli chiari). Tuttavia, aumenta sostanzialmente anche il tasso di false decodifiche, particolarmente a -28 dB e sotto, con un massimo di 29% a -29 dB.

Misure simili sono state fatte per i sottomoduli JT65A e JT65C. I risultati sono quantitativamente simili a quelli mostrati per JT65B in Figura 4; le curve per JT65A sono spostate di circa 1 dB a sinistra (più sensibile di JT65B), mentre quelle per JT65C sono spostate di circa 1 dB a destra.

I normali messaggi JT65 non possono essere decodificati se non è rivelato con sicurezza il vettore di sincronismo. In WSJT la procedura di sincronizzazione è esattamente la stessa per i sottomoduli JT65A, B, e C. Nelle prove mostrate in Figura 4 con SNR minore di -29 dB, l'insuccesso del sincronismo è la causa di molti insuccessi di decodifica. La sincronizzazione è molto importante anche per un'altra ragione: la corretta sincronizzazione può consentire la decodifica della media accumulata del messaggio, indipendentemente dal fatto che il messaggio sia decodificabile dall' algoritmo di Ricerca Approfondita. I tassi misurati di sincronizzazione sono mostrati in Figura 5, di nuovo usando 1000 trasmissioni simulate a ciascun valore di SNR in una gamma di 10 dB. La sincronizzazione ha avuto successo nel 93% delle trasmissioni di prova a -28 dB, 74% a -29 dB, 44% a -30 dB, e 19% a -31 dB. Queste misure implicano che mediare il messaggio avrà successo dopo circa 3 trasmissioni a -26 dB e 8 trasmissioni a -28 dB, ma saranno necessarie fino a 20 trasmissioni a -29 dB. Queste conclusioni sono congruenti con le esperienze in aria con WSJT.

Il simulatore è stato anche usato per misurare i tassi di decodifica dei messaggi sintetici di JT65, come mostrato in Figura 5. Con 1000 prove a ciascun SNR, i messaggi sintetici sono stati decodificati correttamente nell'88% delle prove a -31 dB, 60% a -32 dB, e 26% a -33 dB. Il numero totale di messaggi sintetici erroneamente decodificati è stato di 5, in 11.000 prove. Questi cinque sarebbero stati riconosciuti come spuri da un operatore attento, perché l'offset misurato di frequenza era molto maggiore delle normali tolleranze usate.

Per qualunque ragione fra tante, il comportamento in aria di JT65 può differire un po' dai risultati simulati qui mostrati. Le misure riassunte in Figura 4 e 5 sono state fatte in

condizioni idealizzate con rumore bianco Gaussiano (AWGN) e senza evanescenze. (E' stata condotta un'altra serie di simulazioni con una evanescenza Rayleigh; i risultati sono quantitativamente simili a quelli qui mostrati, con le curve spostate a destra di svariati dB.) Gli effetti di spurie, altre interferenze, e rumore non Gaussiano sono difficili da quantizzare. Io lascio spesso WSJT in funzione in modo "Monitor" per più giorni, col ricevitore sintonizzato su una frequenza arbitraria compresa tra 144,100 e 144,160. Io vivo in una regione molto popolata dove tante spurie ed altri segnali vanno e vengono sulla banda dei 2 m. Il tipico tasso di decodifiche errate con banda tranquilla è in media di uno a due per ora. L'esame dei file con le decodifiche errate mostra sempre delle evidenti particolarità che avrebbero indotto l'operatore a riconoscere e rigettare l'informazione errata. Quando correttamente usato, JT65 è un protocollo di comunicazione molto accurato.

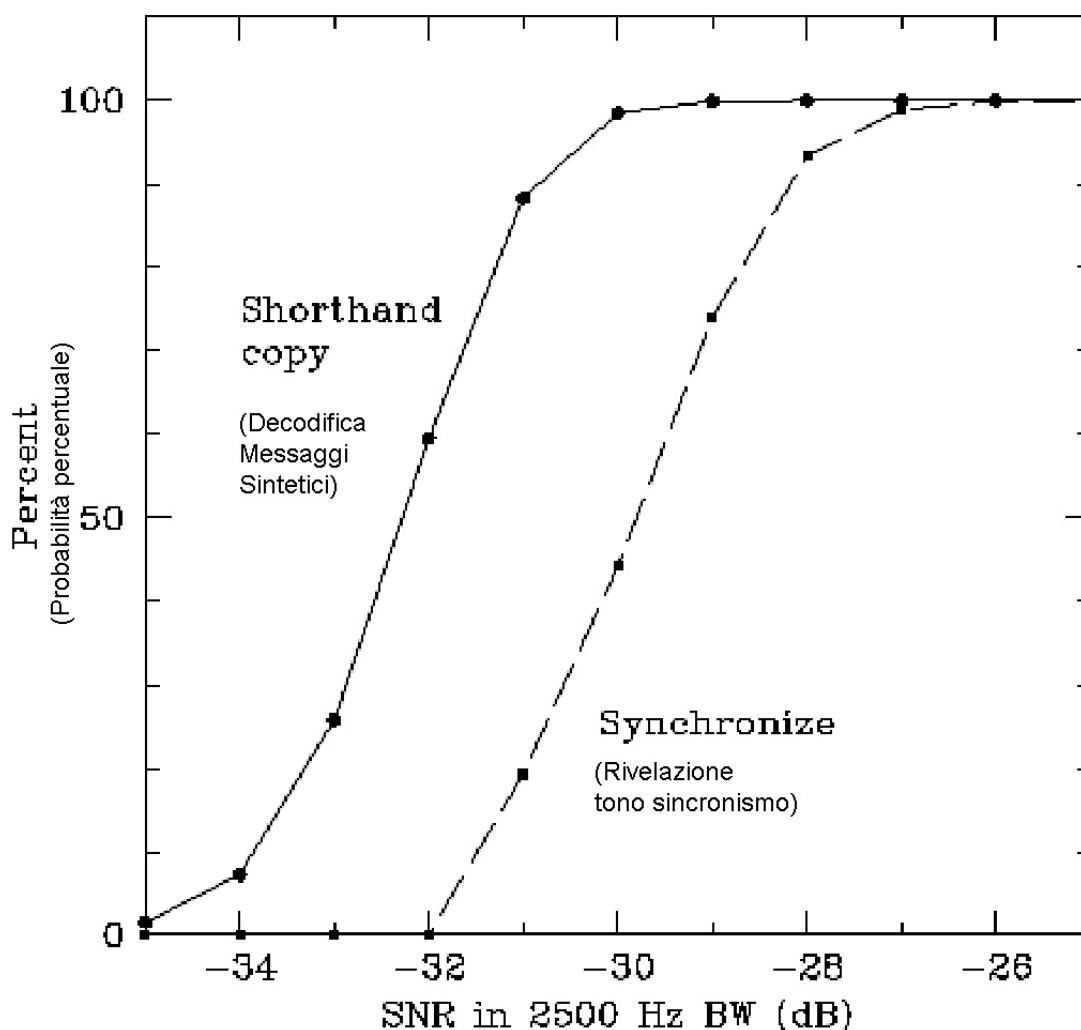


Fig. 5.– Tassi di sincronizzazione e copia di messaggi sintetici in funzione di SNR.