

## Коммуникационный протокол JT65

Joe Taylor, K1JT

**Аннотация.** JT65 является цифровым протоколом, предназначенным для любительской радиосвязи с использованием очень слабых сигналов. Он был разработан для повышения эффективности радиосвязи Земля - Луна - Земля (EME) на УКВ диапазонах и соответствует установленным стандартам и процедурам для таких QSO. JT65 включает возможность коррекции ошибок, что делает его устойчивым и работоспособным даже при сигналах настолько слабых, что их нельзя услышать. Этот документ обобщает технические спецификации на JT65 и содержит дополнительную информацию по обоснованию и философии дизайна этого протокола. Кроме того, здесь представлены некоторые детали реализации JT65 в компьютерной программе, называемой WSJT, а также результаты измерений полученной чувствительности и интенсивности ошибок.

**1. Введение.** Искровой передатчик более 80 лет назад воспроизвел незатухающие электромагнитные колебания. С тех пор практически автоматически международный код Морзе с ключеванием включено-выключено был выбран в качестве режима модуляции для любительской работы со слабыми сигналами. Морзе - удобный, гибкий и легко кодируемый и декодируемый человеком вид работы. Реализация ключевания вкл-выкл тривиальна и необходимая полоса сигнала минимальна. Выбор был очень легким. Однако легко показать, что ни кодирование, ни модуляция CW не являются оптимальными. Когда на счету каждый дБ соотношения сигнал/шум, как при любительских MS и EME радиосвязях, возникает желание исследовать и другие варианты. Персональные компьютеры, оборудованные звуковыми картами, предоставляют прекрасную возможность поэкспериментировать с большим диапазоном возможностей. Программа WSJT (1,2,3) ("Weak Signal communications, by K1JT") является результатом моих усилий по введению более эффективных систем кодирования и модуляции в любительскую слабосигнальную радиосвязь. За короткое время своего существования эта программа стала хорошо известной почти всем VHF/UHF операторам, работающим со слабыми сигналами, и постоянно используется многими из них. На VHF диапазонах подавляющее большинство MS QSO и, пожалуй, половина всех EME QSO в настоящее время проводится с помощью WSJT. Данный документ описывает JT65, один из коммуникационных протоколов, реализованных в программе WSJT. JT65 разработан специально для связи с помощью предельно слабых сигналов, как те, которые бывают при работе EME. Как работать с программой, написано в руководстве пользователя WSJT (4), здесь я коснусь полного технического описания самого протокола и общего описания способа его реализации в WSJT.

Современные цифровые системы связи базируются на математической теории информации. Эта область в основном была создана двумя классическими работами 1948 года, в которых Клод Шеннон доказал, что информация может быть передана по зашумленному каналу с произвольно низкой интенсивностью ошибок при заданной пропускной способности, которые зависят только от ширины канала и соотношения сигнал/шум (SNR). Достижение низкой интенсивности ошибок при плохом соотношении сигнал/шум требует математического кодирования информации пользователя в такую форму, которая является компактной и в то же время содержит аккуратно структурированную избыточность. Компактность необходима для минимизации энергии, излучаемой передатчиком и максимизации объема информации, передаваемой в единицу времени; избыточность необходима для обеспечения целостности сообщения в условиях шумного и нестабильного канала передачи данных. Чтобы быть переданным по радио, закодированное сообщение должно быть «посажено» на несущую частоту использованием некоторого вида модуляции. Возможности почти безграничны: информация может быть передана с помощью изменения амплитуды, частоты или фазы несущей, или комбинацией и того, и другого. Широко используемые схемы цифровой модуляции включают ключевание вкл-выкл (частный случай амплитудной модуляции), ключевание сдвигом

фазы и ключевание сдвигом частоты. Протокол JT65 использует 65-тоновую FSK с постоянной амплитудой колебаний и без фазовых скачков. Такой тип модуляции более эффективен, чем амплитудное ключевание, особенно в комбинации с оптимальной схемой кодирования. Кроме того, он более устойчив при нестабильности частоты, чем ключевание изменением фазы.

Раздел 2 документа начинается с некоторой предварительной информации, которая помогает обосновать дизайн протокола JT65, раздел 3 представляет верхнеуровневый обзор общего дизайна системы. Собственно протокол определен в разделах 4-8 и приложении А, разделы 9-12 описывают прием и декодирование сигнала JT65. Спецификация протокола полностью определяет преобразование любого допустимого сообщения JT65 в передаваемую форму радиосигнала и предоставляет всю информацию, необходимую для декодирования принятого сигнала JT65. Я описал также существенные детали реализации этих процессов в WSJT. Допустимы различные реализации протокола JT65, особенно алгоритмов, используемых для приема. Я надеюсь, что этот документ побудит других радиолюбителей попытаться реализовать эту задачу, и что попытки это сделать приведут к дальнейшему улучшению эффективности и удобства использования этого принципа.

**2. EME QSO: Требования и процедуры.** Любительское радио - это деятельность ради развлечения, и для многих людей развлечение включает проведение QSO со всеми континентами, всеми штатами и с максимально возможным количеством стран DXCC. Достичь таких целей особенно сложно, проводя EME-радиосвязи – и, тем самым, для многих радиолюбителей это наиболее интересно и захватывающе. Чтобы сделать игру такой, чтобы каждый мог ее понимать и играть в нее, необходимо согласовать некоторые базовые основные правила.

Когда сигналы достаточно сильные и обмен информацией между опытными операторами проходит без ошибок, легко оценить, было ли проведено QSO. Когда на любительских KB диапазонах появляется редкий корреспондент, то в возникшем пайлапе проводятся быстрые QSO примерно со следующим обменом:

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

В этом типе QSO K1JT никогда не передает позывной станции, с которой работает, т.к. сама ситуация делает это излишним, и так все ясно. Сигнал может быть не “S9” в обоих приемниках, но это никого не заботит, т.к. прем уверенный. После того, как такой обмен информацией состоялся, обе станции заносят это QSO в свои аппаратные журналы и в дальнейшем обмениваются QSL-карточками в подтверждение проведения этой радиосвязи.

В мире VHF/UHF, и особенно при работе через Луну, сигналы часто очень слабы и обмен информацией даже между опытными операторами далек от безошибочного. Вследствие этого принят более строгий стандарт, который определяет минимальный обмен для правильного QSO. Общепринятые правила утверждают, что допустимое QSO требует, чтобы каждый корреспондент принял полностью оба позывных, рапорт или некоторую дополнительную информацию и явное подтверждение, что корреспондентом принята вся эта информация. Этот принцип применяется и хорошо работает для всех типов «слабосигнальных» QSO, как через тропу, так и MS, EME или другие типы прохождения, и для всех типов аппаратуры и видов модуляции.

Точно следуя этому принципу, минимальное EME QSO здравомыслящих EME-операторов проводится в соответствии со следующей последовательностью:

1. CQ SV1BTR...
2. SV1BTR K1JT...
3. K1JT SV1BTR OOO...

4. RO...

5. RRR...

6. 73...

Для QSO по седу при заранее назначенных частоте и времени, передача #1, естественно, не нужна. Многоточие (...) обозначает повторение сообщений, некоторая форма повторения почти всегда применяется при EME QSO для повышения шансов успеха. Компонент сообщения «OOO» – это условное обозначение минимального рапорта. Он имеет общепринятое значение следующего содержания: «ваши сигналы разборчивы по крайней мере некоторое время, и я принял оба наши позывные». Таким же образом, условное сообщение «RO» передает одновременно рапорт и подтверждение приема. Оно означает, что «я принял оба позывных и рапорт для меня, а для Вас рапорт «O»». Когда K1JT принял подтверждение «RRR», переданное SV1BTR, QSO завершено; но т.к. SV1BTR еще об этом не знает, традиционно передают «73» или другую информацию о завершении QSO, обозначающую «QSO закончено».

Кодовые радиосообщения были широко распространены со времен искровых радиопередатчиков и проводной телеграфии; известные Q-коды – еще один широко известный тип таких сообщений. Они являются простой формой того, что в теории коммуникаций называется «исходное кодирование» сообщения. Выбор «OOO...» (повторяющейся последовательности трех интервалов с включенной несущей, разделенных короткими пробелами, с более длинным пробелом после каждого третьего интервала) в качестве сигнала, означающего положительный рапорт, был сделан осведомленными и опытными CW-операторами, которые знали, что при очень слабых сигналах «тире» легче принимать, чем «точки».

**3. Построение системы.** Рисунок 1 представляет блок-схему современной цифровой системы связи. Для максимальной эффективности при плохом соотношении сигнал/шум сообщение пользователя подвергается исходному кодированию в компактную форму, имеющую минимальную избыточность. Затем оно дополняется математически определенной избыточной информацией, которая позволяет полностью восстановить сообщение, даже если часть его впоследствии будет искажена шумами или выпадениями сигнала. Этот процесс известен как «прямое исправление ошибок» или FEC. Закодированное сообщение, включающее информацию для коррекции ошибок, модулирует несущую. Полученный радиосигнал проходит по радиоканалу, который его ослабляет, возможно на 250 дБ и более для трассы EME, а также вносит шумы и амплитудные, частотные и фазовые изменения «модуляция при распространении сигнала». После приема сигнал демодулируется и декодируется и результат предоставляется пользователю.

За исключением части, связанной с коррекцией ошибок, блок-схема рисунка 1 представляет традиционную любительскую CW-связь, как и современную цифровую. В терминах CW EME QSO, обозначенного выше, исходное кодирование преобразует сообщение «SV1BTR, здесь K1JT, я принял оба наши позывные» в компактную форму «SV1BTR K1JT OOO». Чтобы обеспечить некоторую возможность коррекции ошибок и увеличить шансы приема сообщения CW-оператор повторяет закодированное сообщение много раз в течение периода, отведенного на его передачу. Для дальнейшего увеличения шансов приема сообщения он может форматировать повторения таким образом, чтобы передавать первые 75% времени передачи только позывные, а остальные 25% повторять «OOO». Он предполагает, что принимающий оператор знает об этих соглашениях и слушает соответствующим образом. Все эти формы исходного кодирования помогают больше знать о характеристиках слабого сигнала и обеспечивать более легкий его прием. При особо плохих условиях опытный оператор пытается установить соответствие между тем, что он слышит, и теми компонентами сообщений, которые он ожидает услышать. Если соответствие установлено, прием сообщения может считаться выполненным.

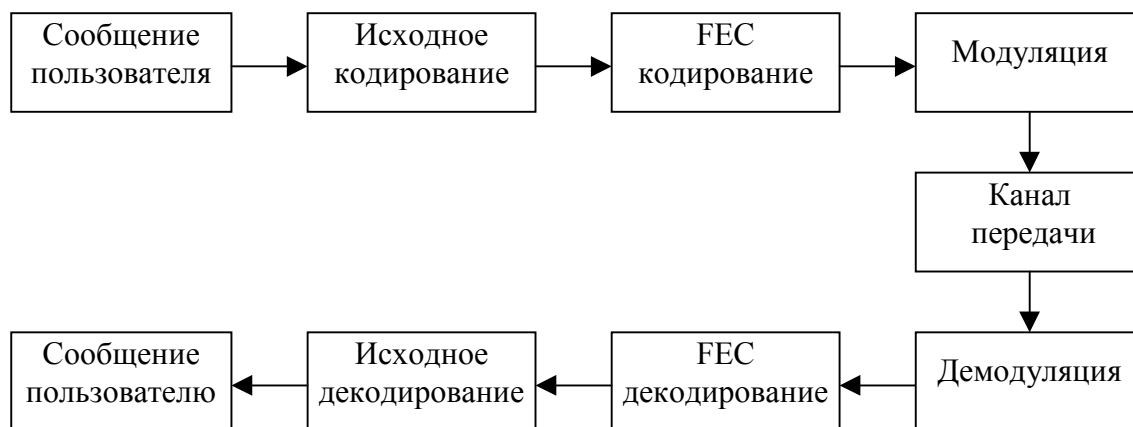


Рис. 1. - Блок схема информационных потоков в системе цифровой связи.

**4. Исходное кодирование JT65.** JT65 использует в точности ту же технологию, начиная с приведения передаваемого сообщения в компактный и рациональный вид. Как написано в руководстве пользователя WSJT 4.7 (4), стандартные сообщения JT65 типа 1 состоят из двух позывных, квадрата QTH-локатора и необязательного рапорта - улучшенная форма сообщений 2 и 3 в приведенном выше модельном QSO между SV1BTR и K1JT. Исходный кодировщик знает правила, по которым составляются обычные радиолюбительские позывные, и использует эту информацию для минимизации требуемого количества бит информации. Любительский позывной состоит из префикса (один или два символа, по крайней мере один из которых - буква, далее идет цифра) и суффикса (от одной до трех букв). В соответствии с этими правилами количество возможных позывных равно  $37 \times 36 \times 10 \times 27 \times 27$ , или что-то около 262 миллионов. (Числа 27 и 37 возникают из-за того, в первой и последних трех позициях символы могут отсутствовать, или быть буквой, или в 1-й позиции - цифрой). Поскольку число 2 в 28-й степени больше, чем 268 миллионов, 28 бит достаточны для однозначного кодирования любого стандартного позывного. Аналогично, количество 4-хсимвольных больших квадратов QRA-локатора равно  $180 \times 180 = 32400$ , что меньше, чем 2 в 15 степени, т.е. 32768; так что локатор требует 15 бит в сообщении. Эти важные идеи эффективного исходного кодирования EME-сообщений предложили в 1996 году Clark и Karn (6). Любое сообщение типа 1 может быть закодировано  $28 + 28 + 15 = 71$  битом, плюс еще один для рапорта. Для сравнения, передача сообщения "SV1BTR K1JT OOO" кодом Морзе требует 170 бит (если бит определяет интервал нажатия длиной в точку) даже без передачи квадрата локатора. Сообщение JT65 гораздо компактнее, чем CW-сообщение, хотя передает значительно больше информации. На самом деле протокол JT65 кодирует рапорт другим способом, а 72-й бит используется для обозначения, что сообщение содержит произвольный текст вместо позывных и локатора. При 43-символьном алфавите максимальная длина текстового сообщения составляет 13 символов (максимальное целое, меньшее  $71 \log_2 / \log_4 3$ ). При этом ограничении объема JT65 может передать в сообщении что угодно.

Как показано выше, около 6 миллионов возможных 28-битовых значений не используется для позывных. Некоторые из этих значений отведены для специальных элементов сообщения, таких как "CQ" и "QRZ". За "CQ" может идти 3 цифры, показывающие частоту для ответа. (Если K1JT передает на стандартной вызывной частоте, скажем, 144.120, и дает "CQ 113 K1JT FN20", значит он будет слушать и отвечать на частоте 144.113). Численный рапорт о силе сигнала вида "-NN" или "R-NN" может передаваться в сообщении вместо локатора. Число NN должно быть от 01 до 30. Если требуется, к одному из позывных может быть добавлен префикс страны или суффикс портативной станции (7), например, ZA/PA2CHR или G4ABC/P. Если используется эта возможность, то дополнительная информация передается вместо обозначения локатора. Некоторые остальные детали кодирования передаваемого сообщения могут быть найдены

в приложении А, а список "добавочных" префиксов и суффиксов приведен в приложении В.

**5. Прямое исправление ошибок.** После сжатия в 72 бита сообщение JT65 дополняется 306-ю однозначно определяемыми битами для коррекции ошибок. Коэффициент кодирования FEC, таким образом, равен  $r = 72/378 = 0.19$ ; соответственно, можно сказать, что каждое сообщение передается с коэффициентом избыточности  $378/72=5.25$ . Однако, с хорошим кодом коррекции ошибок получаемая эффективность и чувствительность намного больше, чем те, которые можно достичь простым пятикратным повторением сообщения. Высокий уровень избыточности обеспечивает очень хороший прием сообщений JT65 в условиях QSB. Сообщения, принимаемые программным обеспечением по крайней мере 10-15 секунд за период передачи [минутный] полностью дешифруются.

Причину этого достаточно мистического "усиления кодированием" понять несложно. С 72 битами общее число возможных сообщений пользователя составляет  $2^72$  в 72-й степени, что чуть больше  $4.7 \times 10^{21}$ . Число возможных комбинаций 378 бит значительно больше, более  $6 \times 10^{113}$ . При однозначном соответствии между 72-битовыми сообщениями пользователя и 378-битовыми "кодowymi словами", или уникальными последовательностями 378 бит, понятно, что очень маленькая часть этих возможных последовательностей используется в коде. Последовательности выбираются такими, чтобы "отличаться друг от друга, насколько это возможно" в строго математическом смысле.

Существует большое разнообразие эффективных способов кодирования для коррекции ошибок, сформулированных математически. Среди наиболее известных - коды Рида-Соломона, используемые для получения очень низкой интенсивности ошибок при считывании информации в современных CD-ROM дисководов и винчестерах. Для JT65 я выбрал код Рида-Соломона RS(63,12), который кодирует 72-битовое сообщение пользователя в 63 шестибитовых "канальных символов" для передачи. Каждое кодовое слово при этом кодировании отличается от каждого другого по крайней мере в 52-х местах - вот почему этот код такой мощный. Даже при очень плохом соотношении сигнал/шум маловероятно перепутать друг с другом различные последовательности.

```
Message #1: G3LTF DL9KR JO40
Packed message, 6-bit symbols: 61 37 30 28 9 27 61 58 26 3 49 16
Channel symbols, including 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

Message #2: G3LTE DL9KR JO40
Packed message, 6-bit symbols: 61 37 30 28 5 27 61 58 26 3 49 16
Channel symbols, including 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

Message #3: G3LTF DL9KR JO41
Packed message, 6-bit symbols: 61 37 30 28 9 27 61 58 26 3 49 17
Channel symbols, including 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
```

Рис. 2. - Показаны три сообщения JT65 в представлении пользователя; в 72-битовой упакованной форме, представленной в виде 12-ти 6-битовых значений символов; и в виде закодированных FEC последовательностей 63-х 6-битовых "канальных" символов.

"Канальные" символы готовы к передаче с помощью 64-тоновой FSK, где каждому значению символа соответствует отдельный тон.

В качестве примера последовательности кода для трех почти одинаковых сообщений показаны на рисунке 2. Строки, обозначенные "packed message", показывают исходно закодированные 72-битовые сообщения пользователя в виде последовательности двенадцати 6-битовых символов. Если читать их слева направо, то видно, что значение пятого символа меняется с 9 на 5 при смене последней буквы первого позывного с F на E. Последний символ исходного кода меняется с 16 на 17 при смене локатора с JO40 на JO41. Во всем остальном все три упакованных сообщения одинаковы. С другой стороны, три закодированных последовательности "канальных" символов выглядят совершенно отличающимися друг от друга, настолько разными, что практически нет шансов, что, если они вообще декодируются, их искаженные шумами версии будут перепутаны при декодировании. Полное и точное сообщение пользователя принимается с большой вероятностью, даже если соотношение сигнал/шум "нажатия ключа" от 2 до 6 дБ в полосе 2.7 Гц (или от -28 до -24 дБ в полосе 2500 Гц, условной полосе, используемой в WSJT для обозначения уровня сигнала). Это утверждение может быть уточнено с помощью измерений интенсивности ошибок при передаче, как функции соотношения сигнал/шум, и эти измерения обобщены для JT65 в приложении С.

**6. Перестановки и коды Грея.** После кодирования порядок символов JT65 переставляется с помощью записи их построчно в матрицу 7x9 и затем считывания их по столбцам. Когда я в первый раз изучал FEC при разработке JT65, я ошибочно считал, что шифрование порядка следования символов даст большую устойчивость системе при выпадениях сигнала. Фактически это не так, но так как это действие безобидное, процедура осталась неизменной для совместимости вида сигналов JT65 в последующих версиях программы. Переставленные символы преобразуются из двоичного вида в коды Грея, что делает JT65 несколько более устойчивым к нестабильности частоты.

**7. Короткие сообщения.** Подобно режиму CW, JT65 использует специальный формат сигналов, чтобы передавать часто используемые сообщения наиболее эффективным и надежным способом. Выше определены три таких сообщения. Они точно соответствуют передачам 4, 5 и 6 в модели CW QSO между SV1BTR и K1JT, передавая сообщения "RO", "RRR" и "73". Вместо использования ключевания несущей частоты в соответствии с шаблоном типа ти-та-ти, та-та-та, и т.п., JT65 передает "RO" с помощью двух чередующихся тонов с определенными частотами и скоростью ключевания. Сигналы такой формы легко узнаются и отличаются от других, в том числе от "нормальных" сигналов JT65. На самом деле многие пользователи отмечали, что короткие сообщения JT65 быстро распознаются (декодируются) даже человеком-оператором с использованием зрения или слуха, так же как и компьютером.

**8. Синхронизация и модуляция.** JT65 использует минутные последовательности прием/передача и требует точной синхронизации времени и частоты между приемником и передатчиком. Обычное радиолобительское оборудование не может обеспечить выполнения этой задачи с достаточной точностью в открытом контуре, так что сигнал JT65 должен содержать собственную информацию о синхронизации. Поэтому в сигнале в промежутки между информационными битами вставлен псевдослучайный "вектор синхронизации". Он позволяет точно определить относительные ошибки по времени и частоте, таким образом устанавливая точную структуру, в которой может работать декодер сигнала. Кроме того, он позволяет усреднять успешно принятые сигналы, так что декодирование становится возможным, даже если сигналы настолько слабы, что не поддаются декодировке по отдельности. Синхронизирующая часть сигнала настолько важна, что (за исключением коротких сообщений) половина времени каждой передачи отводится для нее.

Передача JT65 разделена на 126 смежных интервалов времени, каждый длительностью 0.372 сек (4096 выборок при 11025 выборках в секунду). Внутри каждого

интервала форма сигнала - это синусоида с постоянной амплитудой на одной из 65-ти predetermined частот, смена частоты между интервалами выполняется без изменения фазы. Передача штатно начинается по времени  $t = 1$  сек после начала UTC-минуты и заканчивается при  $t = 47.8$  сек. Синхронизирующий тон имеет частоту 1270.5 Гц и выдается в каждом интервале, имеющем значение "1" в псевдослучайной последовательности, приведенной вверху на рисунке 3. Эта последовательность имеет то замечательное математическое свойство, что ее нормализованная автокорреляционная функция падает с 1 почти до 0 для всех ненулевых интервалов запаздывания. Как следствие, получается прекрасный вектор синхронизации.

Закодированная информация пользователя передается в течение 63-х интервалов, не используемых для передачи синхронизирующего тона. Каждый «канальный символ» генерирует тон на частоте  $1270.5 + 2.6917(N+2)m$  Гц, где  $N$  - целочисленное значение символа,  $0 \leq N \leq 63$ , а  $m$  принимает значения 1, 2 или 4 для разновидностей режима JT65 A, B и C. Рапорт "OOO" передается с помощью перестановки (реверсирования) позиций, в которых передаются сигнал синхронизации и собственно данные в псевдослучайной последовательности. Поскольку обычные сообщения зависят от точной синхронизации, их передача может быть начата только по началу UTC-минуты.

```

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

```

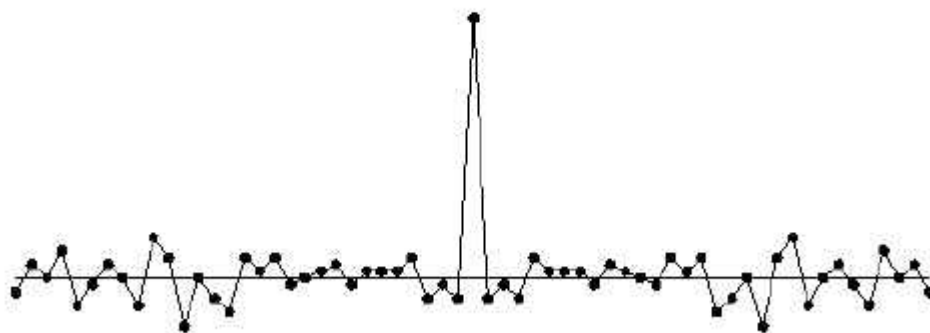


Рис.3. – Псевдослучайная последовательность, используемая в JT65 в качестве «синхронизирующего вектора», и графическое представление ее автокорреляционной функции. Отдельный пик в центре служит для синхронизации по времени и частоте между приемной и передающей станциями.

Короткие сообщения свободны от «синхронизирующего вектора» и используют интервалы по 1.486 с (16384 выборки) для чередующихся тонов. Нижняя частота тона всегда 1270.5 Гц, та же, что и для синхронизирующего тона. Промежуток между тонами составляет  $26.917nm$  Гц, где  $n = 2, 3, 4$  для сообщений RO, RRR и 73. К тому моменту, когда есть смысл выдавать эти сообщения при проведении QSO, разница частот приемника и передатчика уже бывает измерена с высокой точностью. Вследствие этого оператор может точно определить, что короткое сообщение пришло именно от той станции, с которой он работает. Для коротких сообщений не требуется точной синхронизации по времени, так что их передача может быть начата в любое время в течение периода работы на передачу.

Теперь должно быть понятно, что JT65 не передает сообщения буква за буквой, как это делается кодом Морзе. Вместо этого все сообщение целиком преобразуется в уникальную строчку из 72 бит, а затем в последовательность из 63-х 6-битовых символов. Эти символы передаются по радиоканалу, некоторые доходят целыми, остальные искажаются шумами. Если достаточное количество символов принято правильно (в вероятностном смысле), все 72-битовое сжатое сообщение восстанавливается в точности.

Декодированная цепочка бит преобразовывается обратно в понимаемое человеком сообщение, которое было передано. Схема кодирования и FEC гарантируют, что сообщения никогда не декодируются в виде фрагментов. Компоненты сообщений не могут быть перепутаны с другими компонентами и позывные никогда не отображаются с недостающими или неправильными буквами/цифрами. Для букв O или R в позывном нет шансов быть перепутанными с рапортом или подтверждением, для фрагментов позывного типа N8CQ или локатора типа EM73 нет шансов быть неправильно расшифрованными. Если Вашего партнера по скеду не видно, и вместо него в его позиции сообщения Вас зовет другая станция, Вы никогда не сделаете ошибочное заключение, что скед идет, как планировалось.

**9. Прием и демодуляция.** В программе WSJT принятый JT65-сигнал преобразуется и анализируется с использованием последовательности хорошо известных DSP способов. Процесс начинается со звукового сигнала с полосой примерно 0-3 кГц, оцифрованного с номинальной скоростью 11025 выборок в секунду. Цифровой сигнал пропускается через ФНЧ и частота выборки понижается в два раза. С помощью дискретного преобразования Фурье сдвигаемых блоков по 2048 выборок вычисляется спектр мощности и проверяется на наличие шаблона псевдослучайной синхронизирующей последовательности. Обнаружение и выделение синхронизирующей структуры определяет необходимые величины отклонений частоты и времени, которые могут включать как сдвиг Доплера и задержку распространения сигнала на трассе EME, так и ошибки установки частоты и времени. Точность синхронизации составляет около 1.5 Гц по частоте и 0.03 секунды по времени. Как только получена синхронизация, программа заново измеряет частоту синхронизирующего тона в разных группах тональных интервалов и по результатам измерений подбирает сглаживающую кривую, таким образом обеспечивая отслеживание и компенсацию небольшого дрейфа частоты. Когерентное отслеживание фазы между символами не требуется.

Имея информацию о точной синхронизации, программа вычисляет 64-точечный спектр для каждого из 63 «канальных символов». Эти спектры имеют разрешение 2.7m Гц (например, 5.4 Гц для подрежима JT65B, для которого  $m=2$ ) и для очень слабых сигналов они практически имеют тот же вид, что и спектр шумов. Большинство отдельных тонов, передающих данные, не выделяются из шума. Тем не менее, при усреднении в каждом интервале одна точка, показывающая частоту полезного сигнала, будет иметь увеличенную амплитуду по сравнению с остальными. Используя известные статистические свойства случайного Гауссова шума, WSJT вычисляет вероятность того, что был передан символ с одним из возможных значений. Эта вероятностная информация, основанная на вычисленных спектрах синхронизированных символов, и есть базовая принятая информация. После удаления кодов Грея и перестановки символов эти вероятности передаются декодеру.

**10. Декодер Рида-Соломона.** Даже слабенький код коррекции ошибок, такой как RS(63,12), очень трудно «инвертировать» или декодировать эффективно (с малыми затратами). Основная проблема вот в чем: дан измеренный спектр для каждого из 63-х «канальных символов», спрашивается, содержится ли в нем уникальная 72-битовая последовательность, которая может быть достоверно распознана как сообщение пользователя? В принципе, можно закодировать все  $2^{72}$  возможных сообщений пользователя и сравнить результаты с принятыми спектрами на предмет поиска совпадения. Однако, такой метод практически неприменим: простые оценки показывают, что на современном 3-гигагерцовом компьютере с неограниченным объемом памяти и очень эффективной программой декодирование таким способом одного принятого сообщения займет 200 миллионов лет.

Коды Рида-Соломона важны с экономической точки зрения, потому что для их декодирования существуют хорошо разработанные математические алгоритмы. Алгоритмы различаются по сложности и по тому, насколько они приближаются к идеальной чувствительности только что описанного метода «в лоб». С версии 4.5 WSJT



использует алгоритм, который представляет сегодняшние достижения в декодировании кодов Рида-Соломона. Он базируется на исследовательском документе, авторами которого являются Ralf Koetter и Alexander Vardy (8), и использует лицензионный компьютерный код их фирмы CodeVector Technologies. Имея на входе вероятностную информацию о значениях принятых символов, этот декодер дает четкий результат для каждой анализируемой передачи. С очень высокой надежностью он возвращает или 72 бита переданного сообщения или признак, означающий «результата нет».

Для декодеров WSJT были аккуратно измерены интенсивности ошибок как функции уровня сигнала. Итоговые результаты приведены в приложении С. Коротко говоря, K-V декодер показывает резкий переход с «почти все декодировано» в «почти все не декодировано», когда соотношение сигнал/шум ухудшается примерно с  $-23$  до  $-25$  дБ по шкале WSJT (для JT65B). Результаты показывают также, что с «чистыми» данными (аддитивные Гауссовы шумы и, возможно, фединг, но без помех от других сигналов), ложные декодирования алгоритма K-V для RS(63,12) настолько редки, что трудно «поймать» даже один такой случай.

**11. Декодер "глубокого поиска".** Что делать, если K-V декодер не дал результата? Можно ли еще что-нибудь предпринять? Жизнь слишком коротка, чтобы искать совпадения с каждым из  $2^{72}$  возможных сообщений пользователя, но количество сообщений, передаваемых в реальных EME QSO, на самом деле гораздо меньше, чем  $2^{72}$ , а тех сообщений, которые мы больше всего ждем, еще меньше. Если наиболее правдоподобные и ожидаемые сообщения будут проверены первыми - более-менее тем же манером, что и при приеме очень слабого CW сигнала - и алгоритм поиска будет использовать "тайм-аут", если за какое-то приемлемое время он не нашел совпадений, то метод "в лоб", описанный выше, может быть применен на практике. В WSJT процедура, которую я называю алгоритм "глубокого поиска", как раз и пытается это сделать.

"Глубокий поиск" начинается со списка правдоподобных позывных и локаторов. Такие списки давно ведутся большинством EME-операторов как по памяти, так и в бумажном виде. Они могут здорово помочь, когда пытаешься определить, чье слабое CQ ты слышишь, или кто отвечает на твоё CQ, или зовет в конце твоего QSO. В декодере "глубокого поиска" WSJT каждый элемент этого списка комбинируется с "CQ" и с позывным пользователя WSJT, таким образом составляются проверяемые гипотетические сообщения. Если в списке  $N_c$  позывных, то генерируется примерно  $2N_c$  сообщений, они кодируются и "канальные символы" проверяются на хорошее совпадение с наблюдаемыми спектрами. Вы можете задать список предпочтительных позывных как угодно. С WSJT поставляется файл примера, содержащий позывные около пятисот станций мира, известных своей активной работой с DX на УКВ диапазонах. "Продвинутые" пользователи JT65 ведут свои собственные файлы, добавляя и удаляя позывные по своему усмотрению.

В сущности, Ваша база данных с позывными определяет набор фильтров совпадений, созданный для Вашей станции и настроенный на оптимум чувствительности для подмножества сообщений, которые Вы ожидаете принять. "Глубокий поиск" нечувствителен к сообщениям с позывными, которых нет в базе данных, или к произвольному обычному тексту, или к чему-то кроме "CQ" или Вашего позывного в первом поле сообщения. Такие сообщения будут декодироваться только с известной чувствительностью K-V алгоритма. Тем не менее, для любого сообщения из описанного выше подмножества декодер "глубокого поиска" обеспечивает примерно на 4 дБ большую чувствительность с той же низкой интенсивностью ошибок. Должно быть очевидно, что эти лишние 4 дБ эквивалентны широко известному так называемому "усилению засчет скеда", которое дополнительно получает CW оператор, когда принимает заранее известный позывной или проводит заранее запланированное QSO.

**12. Декодирование коротких сообщений.** В дополнение к поиску синхронизирующего тона, модулированного известной псевдослучайной последовательностью, WSJT ищет чередующиеся тона, имеющие модуляцию коротких

сообщений JT65. Частоты измеряются и сравниваются с частотой синхронизирующего тона предыдущей передачи, затем проверяется, что модуляция соответствует оговоренному меандру. Если частоты и модуляция подходят, и если амплитуда превышает заданный порог, констатируется получение короткого сообщения. Ввиду жестких допусков на частоту и распределение интервалов времени, может быть установлен низкий (по амплитуде) порог детектирования при сохранении очень низкой интенсивности ошибок (ложных детектирований). В приложении С вместе с данными для К-V алгоритма и декодера "глубокого поиска" представлены кривые измеренной чувствительности и для коротких сообщений.

**13. Ответственность оператора и целостность сообщений.** QSO, проводимые с использованием любого режима WSJT, включая JT65, требуют активного участия оператора на всех стадиях проведения QSO. В условиях несущих, QRM, QRN и других эффектов, таких как искажения сигнала из-за прихода по разным путям распространения, участие оператора необходимо для избежания ошибок при интерпретации того, что выдает программа. Многие операторы убедились, что они легко достигают необходимого уровня мастерства, проведя первые несколько JT65-связей.

Нет особой нужды специально говорить о том, что JT65 обеспечивает возможность соблюдения процедуры проведения правильного EME QSO, приведенной в разделе 2. Радиосвязи, проведенные WSJT, документируются автоматически. Если успешно проведено JT65 QSO, операторы знают, что обмен всей необходимой информацией выполнен. Более того, если нужно, они имеют записанные звуковые файлы для доказательства этого. Эти файлы хранят «битовый поток», неподкупное по своей природе доказательство приема, которое каждый может проверить. После особенно интересного или трудного QSO часто происходит обмен по E-mail записанными файлами и образами экрана. Я собрал большую библиотеку звуковых файлов JT65 – после моих собственных QSO и мониторинга диапазонов, много файлов также прислано мне другими радиолюбителями. Эти файлы показали себя очень полезными при доработке алгоритмов WSJT для получения оптимальной чувствительности и минимальной интенсивности ошибок в реальных условиях. В предстоящие годы ожидается дальнейший прогресс в этих областях.

**14. Опыт работы в эфире.** Первая работающая версия JT65 была сделана в ноябре 2003 г. Первоначальные ее тесты в эфире с N3FZ быстро подтвердили мои ожидания, что JT65 станет мощным новым оружием в арсенале VHF/UHF DX-мэнов. Практические выгоды использования кодов коррекции ошибок в слабосигнальной любительской радиосвязи были очевидны. Слегка удивившись, я узнал, что NASA всегда при передаче фотоснимков из дальнего космоса на Землю использует компактное исходное кодирование и мощный FEC. При связи с аппаратами в дальнем космосе каждый лишний дБ чувствительности помогает сэкономить миллионы долларов, которые иначе пришлось бы потратить на увеличение размеров антенн и передаваемой мощности.

Протокол JT65 претерпел очень небольшие изменения с момента первых тестовых QSO. За это время декодеры были сильно доработаны, обеспечив значительное улучшение характеристик при работе в эфире. У меня нет способа узнать, сколько QSO было проведено с использованием JT65, но их, конечно, многие тысячи. Пользователи не стеснялись сообщать об обнаруженных ошибках в программе и предлагали улучшения интерфейса пользователя, и WSJT сильно выиграла от этого. Появилась значительная по численности новая группа энтузиастов EME, привлеченная тем фактом, что JT65 EME QSO можно проводить на более простом оборудовании, чем при использовании традиционных методов. Сотни EME QSO были проведены на двух метрах станциями, использующими 150 Ватт мощности и одиночные Yagi, а QSO с «биг ганами» были проведены с мощностью 5 Ватт. Даже EME QSO на 50 МГц, долгое время считавшиеся очень трудными, стали обычным делом.

**15. Что дальше.** Я не вижу необходимости больших доработок или расширений технической спецификации протокола JT65. Тем не менее, я считаю, что есть много

моментов, по которым можно улучшить его реализацию. Для начала, неплохо бы обрабатывать принятые звуковые данные по мере их получения, а не в «пакетном режиме» после окончания приемного периода времени. Это позволило бы иметь спектральный дисплей реального времени, и я могу вообразить возможность «раннего декодирования» сигналов после приема данных в течение 20 или 30 секунд. Я обнаружил, что некоторые звуковые карты выдают до 0.6% ошибок при заданных скоростях выборок. В настоящее время декодеры JT65 не пытаются корректировать эти ошибки и излишне падает чувствительность. Конечно, может быть лучше сделано обнаружение и подавление помех. Может быть улучшен алгоритм, используемый в настоящее время для отслеживания уходов частоты принимаемого сигнала. Желательно сделать точное отслеживание Доплеровских изменений частоты, особенно для 432 и 1296 МГц. Было бы полезно введение более точного управления интервалами времени приема и передачи, вероятно, это возможно даже под Windows. Скорость выполнения процедур декодирования также может быть улучшена... Список можно продолжать и продолжать. Вероятно, другие радиолюбители могут взять на себя некоторые из этих доработок, или придумать другие улучшения, возможно, даже более важные.

### Приложение А. Подробности кодирования сообщений

Как описано в разделах 4-6, кодирование сообщений JT65 выполняется в несколько этапов. Сообщение пользователя сначала «исходно кодируется» в компактную форму, требующую всего 72 бита. Биты пакуются в двенадцать 6-битовых информационных символов, а кодирование Рида-Соломона добавляет 51 «символ четности». 63 символа для передачи переставляются, кодируются кодом Грея, и передаются с использованием 64-тоновой FSK. Вектор синхронизации передается на 65-й частоте, на два тональных интервала ниже самой низкой частоты для передачи данных.

Некоторые дополнительные подробности определяют дальнейшие детали по упаковке сообщений и порядку следования «канальных символов». Чтобы сделать для других легче реализацию протокола JT65, эти вещи хорошо описаны в примерах исходного кода. Ниже приведена программа на Фортране, которую легко скомпилировать под Linux. Здесь приведена только основная программа, полный исходный код, включая необходимые подпрограммы и makefile для Linux, могут быть перекачаны отсюда: [pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/JT65code.tgz](http://pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/JT65code.tgz). Скомпилированная программа принимает сообщение JT65 (введенное в кавычках в командной строке) и выдает упакованное сообщение и каналные символы в виде 6-битовых значений. Примеры вывода программы были приведены на рисунке 2 и описаны в разделе 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 "000" 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

```

## Приложение В. Поддерживаемые префиксы и суффиксы позывных

Префиксы и суффиксы позывных, поддерживаемые JT65, перечислены в файле pfx.f, входящем в архив исходного кода pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/JT65code.tgz. Поддерживаемые суффиксы включают /P и /0.../9, а полный список префиксов приведен ниже. В будущем могут быть добавлены дополнительные префиксы и суффиксы. Место для 450 префиксов зарезервировано за счет того, что не поддерживается использование локаторов, находящихся в пределах пяти градусов от северного полюса.

```

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

```

## Приложение С. Измеренные чувствительность и интенсивность ошибок

Протокол JT65 может быть определен раз и навсегда, а характеристики, показываемые им в эфире, зависят от программной реализации декодера. Как написано в разделах 9-12, версия 4.9 WSJT выполняет JT65-декодирование в три приема: программный декодер Рида-Соломона, декодер глубокого поиска и декодер коротких сообщений. В разделе 13 подчеркивается, что в условиях помех (несущие, атмосферные помехи, другие помехи) действия оператора являются существенной частью процесса декодирования. Оператор может включить функцию «Zap» для подавления несущих, «Clir» для подавления широкополосных импульсных пиков, «Freeze» для ограничения диапазона частот поиска синхронизирующего тона. Пользуясь соответствующим образом этими средствами, а также графическим и символьным дисплеями программы, оператор может распознать и отбросить ложную информацию, выдаваемую декодером.

В «нормальных» условиях, в которых канал передачи можно характеризовать простым затуханием, добавлением белого Гауссова шума и, возможно, умножением на коэффициент «Релеева фединга», чувствительность и интенсивность ошибок декодера могут быть точно измерены. В качестве первой (и очень важной) части разработки

программы WSJT для платформы Linux была написана программная модель, которая выполняет все это. Модель может генерировать цифровой сигнал для любого режима WSJT и вставлять его в Гауссов шум с заданным соотношением сигнал/шум и ограниченной полосой и с возможностью задания фединга. Полученный звуковой файл можно сохранить в формате wav, а затем открыть и декодировать в WSJT. Файлы также могут быть декодированы непосредственно в модели, используя программу, идентичную WSJT декодеру, но скомпилированную под Linux.

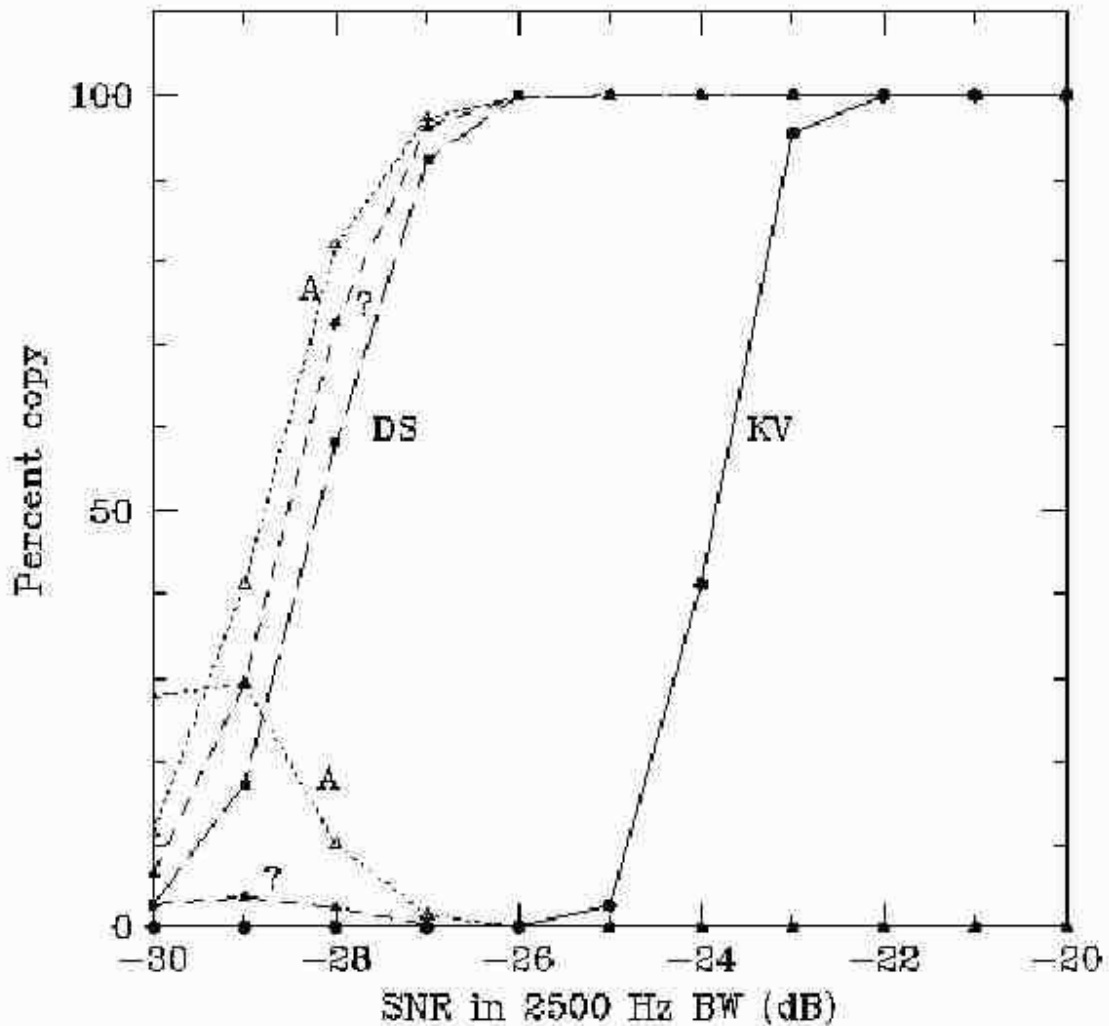


Рис. 4. - Измеренные коэффициенты вероятности приема как функции соотношения сигнал/шум (SNR) для JT65B. Кривая, помеченная KV, относится к алгоритму Koetter-Vardy; DS соответствует алгоритму глубокого поиска. Коэффициент ложного декодирования для KV-алгоритма слишком мал и не поддается измерению; для DS-алгоритма коэффициент «фатальных ошибок» около 0.03%, слишком маленький для того, чтобы быть различимым на этом графике. Кривые, помеченные «?» и «А» слева внизу показывают программные ошибки алгоритма глубокого поиска для декодированных сообщений, помеченных «?», и когда включен режим «агрессивное декодирование» — «А».

Таким способом было проверено несколько сотен тысяч смоделированных передач сообщений JT65 – сначала для отладки и точной настройки декодеров, а затем для измерения чувствительности и коэффициента ошибок готовой программы. Результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5. Для рисунка 4 было сгенерировано 1000 модельных сообщений, которые были проверены при уровнях с/ш= -30, -29, ..., -20 дБ, использовались стандартные сообщения JT65, состоящие из двух позывных и локатора.

Полный декодер WSJT (версии 4.9.5) был проверен на каждом из получившихся 11000 сигналов. Сплошная кривая с закрашенными кружочками на рисунке 4 показывает результаты для декодера Koetter-Vardy. Вывод состоит в том, что 96% сигналов правильно декодируются при  $c/\text{ш} = -23$  дБ, 41% при  $-24$  дБ и 3% при  $-25$  дБ. При этих испытаниях не было ни одного ложного декодирования KV декодером.

Для алгоритма глубокого поиска кривая из длинного пунктира с закрашенными квадратиками показывает, что 92% сигналов декодировано правильно при  $-27$  дБ, 58% при  $-28$  дБ и 17% при  $-29$  дБ. Были обнаружены три «фатальные ошибки» (ложное декодирование, не помеченное знаком вопроса) на 11000 модельных сигналах, т.е. общая интенсивность ошибок  $2.7 \times 10^{-4}$  (слишком мала, чтобы ее увидеть на рисунке 4). Если считать правильно декодированные сообщения, помеченные знаком вопроса, процент правильных декодирований составит 96%, 73% и 29% для уровней сигналов  $-27$ ,  $-28$  и  $-29$  дБ (кривая из короткого пунктира с закрашенными треугольниками). Коэффициент ошибок, отображенный в виде кривой из короткого пунктира слева внизу на рисунке 4, достигает максимума 3.6% при  $-29$  дБ. С включенной опцией WSJT «агрессивное декодирование» процент правильного декодирования возрастает до 97%, 82% и 41% для  $-27$ ,  $-28$  и  $-29$  дБ (кривая из точек с пустыми треугольниками). Однако, сильно растет и процент ложных декодирований, особенно при  $-28$  дБ и ниже, достигая максимума в 29% при  $-29$  дБ.

Аналогичные измерения сделаны для подрежимов JT65A и JT65C. Результаты качественно те же, что показаны на рисунке 4 для JT65B, но кривые для JT65A сдвинуты влево примерно на 1 дБ (более высокая чувствительность, чем у JT65B), а для JT65C они сдвинуты вправо примерно на 1 дБ.

Нормальные сообщения JT65 не могут быть декодированы, пока не выполнено надежное детектирование синхронизирующего вектора. Процедура синхронизации WSJT одинакова для подрежимов JT65A, B и C. Для тестов, результаты которых отражены на рисунке 4, при соотношении  $c/\text{ш}$  менее  $-29$  дБ невозможность декодирования вызвана, как правило, невозможностью выделить синхровектор. Синхронизация очень важна и по другой причине – правильная синхронизация позволяет декодировать накопленное усредненное сообщение, независимо от того, декодируемо ли с помощью алгоритма глубокого поиска принятое в данный момент сообщение. Измеренные коэффициенты получения синхронизации показаны на рисунке 5, опять для 1000 модельных сигналов и каждого значения соотношения  $c/\text{ш}$  в 10 дБ диапазоне. Синхронизация достигается для 93% тестовых сигналов при  $-28$  дБ, 74% при  $-29$  дБ, 44% при  $-30$  дБ и 19% при  $-31$  дБ. Эти измерения означают, что усреднение сообщений сработает после примерно 3 приемов сигнала с уровнем  $-26$  дБ, 8-ми с уровнем  $-28$  дБ, а для  $-29$  дБ потребуется около 20 приемов сигнала. Эти выводы соответствуют опыту работы в эфире с WSJT.

Модель использовалась также для измерения коэффициентов успешного детектирования коротких сообщений JT65, как показано на рис. 5. При 1000 примеров для каждого значения  $c/\text{ш}$  короткие сообщения правильно декодировались в 88% случаев при уровне  $-31$  дБ, 60% при  $-32$  дБ и 26% при  $-33$  дБ. Общее число неправильно декодированных коротких сообщений было 5 при 11000 испытаниях. Все 5 были бы распознаны внимательным оператором как ложные, потому что измеренный сдвиг частоты был намного больше, чем обычно используемые величины допусков.

По целому ряду причин характеристики JT65 в реальном эфире могут отличаться от показанных здесь модельных результатов. Измерения, приведенные на рис. 4 и 5 были сделаны в идеализированных условиях с аддитивным белым Гауссовым шумом (AWGN) и без фединга. (Были проведены дополнительные испытания с добавлением Релеева фединга, результаты качественно подобны приведенным здесь, но кривые сдвинуты на несколько дБ вправо). Эффекты от несущих, других помех, негауссовых шумов количественно оценить трудно. Но я часто оставляю WSJT, работающую в режиме мониторинга целыми сутками, с приемником на произвольной частоте между 144.100 и 144.160. Живу я в густонаселенном районе, несущих и других сигналов на 2-м диапазоне

хватает. Типичное среднее число ложных декодирований при отсутствии прохождения не превышает одного-двух в час. Проверка файлов, вызывающих ложные декодирования, почти всегда показывает наличие в них очевидных причин, которые должны заставить оператора обнаружить и игнорировать ложную информацию. При использовании по назначению JT65 является очень точным коммуникационным протоколом.

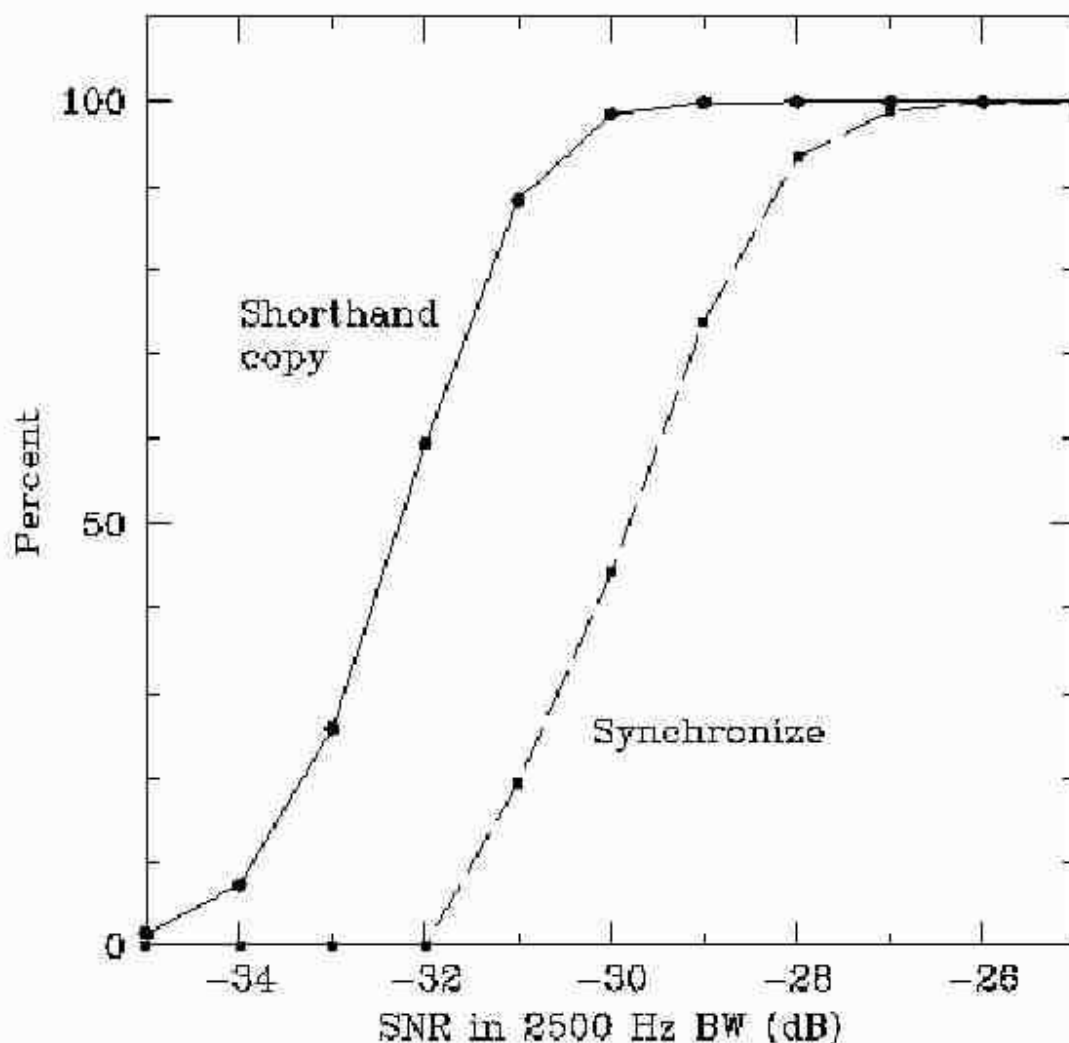


Рис. 5. - Коэффициенты получения синхронизации и декодирования коротких сообщений как функции соотношения сигнал/шум.

Версия от 8 марта 2005 г.

(1) См. домашнюю страницу WSJT: <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) Руководство пользователя *WSJT 4.7* можно взять здесь:  
[http://pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/WSJT\\_User\\_470.pdf](http://pulsar.princeton.edu/~joe/K1JT/WSJT_User_470.pdf).

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

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

(7) Префиксы и суффиксы позывных учитывались немного разными способами в версиях WSJT 4.9.2 и более ранних.

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

\*\*\*\*\*

Перевел RAZDUT.

Оригинал статьи есть в файловом архиве vhfdx.ru:

[http://www.vhfdx.ru/index.php?option=com\\_remository&func=fileinfo&filecatid=55](http://www.vhfdx.ru/index.php?option=com_remository&func=fileinfo&filecatid=55)