

FreeDV-036 Radio Autoencoder (RADE) V1 Introduction and Waveform Description

David Rowe VK5DGR

Sat Oct 5 09:21:06 2024 Git: (in *packed-refs*) 7 on branch

Japanese Translation by RADE test team Yuichi Matsui, JH0VEQ. Oct.19. 2024 draft4

1 はじめに(Introduction)

ラジオ・オート・エンコーダ (RADE) V1の目的は、HF無線周波数で音声を送信することです。音声信号の帯域幅は8kHzですが、RADE V1信号のRF帯域幅は1500Hz(-6dB値)で済みます。ピーク対平均電力比 (PAPR) は1dB未満で、送信機のパワーアンプを効率的に使用できます。

私たちのテストによると、RADEは低SNRおよび高SNRのHF無線周波数で良好に動作し、SSBや従来のデジタル音声システムと比較して、印象的なスピーチ品質を持っています。RADE V1は、従来のデジタル音声システムよりも多くのメモリとCPUを必要としますが、一般的なPCのリソースで問題なく動作します。

RADEは、FreeDV-GUIアプリケーションV2.0以上を使用して、Windows PCまたはラップトップ上で動作させることができます。

このドキュメントは、RADE のバージョン 1 の紹介と波形の説明です。対象読者は、アマチュア無線家およびアマチュア無線を管理する規制機関です。

1.1 謝辞(Acknowledgements)

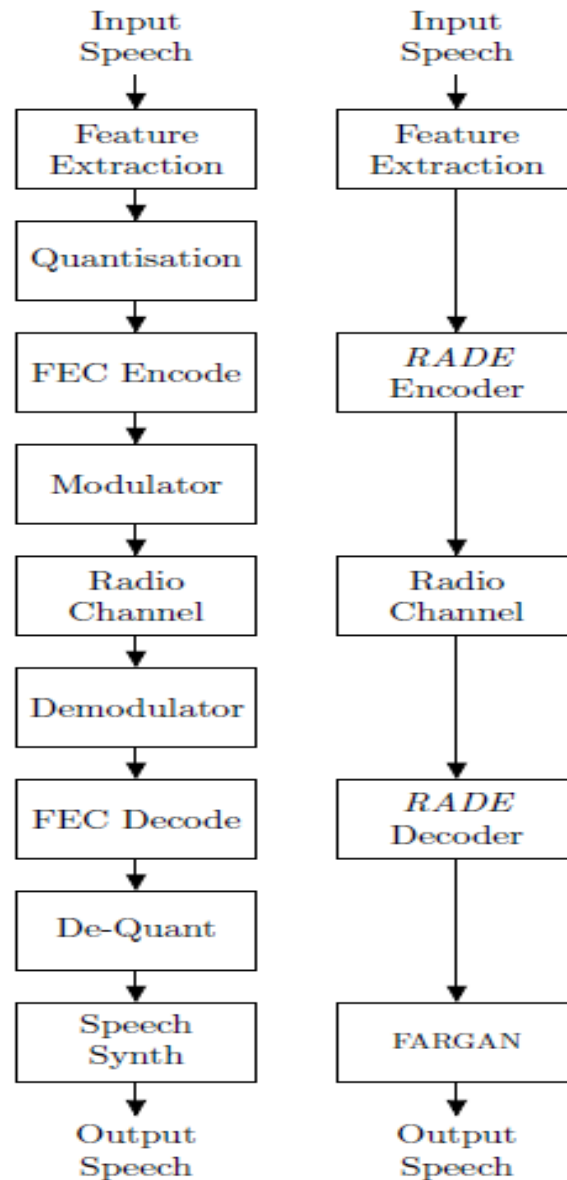
RADEのコンセプトは、Jean-Marc ValinとDavid Roweのディスカッションから発展しました。Davidは、数ヶ月かけ、このコンセプトを基に、HF無線周波数でのスピーチ用の実用的なOver-the-Air波形を開発しました。Mooneer Salem は FreeDV GUI アプリケーションへの RADE の統合を担当しています。FreeDV Project Leadership Team をはじめとする多くの人たちが、2024 年の間、サポートやテストに協力してくれました。David、Mooneer、FreeDV PLT の貢献は、Amateur Radio Digital Communications (ARDC) からの助成金によって支援されています。

2 RADE概要 (Radio Autoencoder)

図 1 は、従来からの無線デジタル・スピーチ・システムとRADEを比較したものです。

従来の無線デジタルスピーチ・システムでは、スピーチ・エンコーダ (Feature Extraction) がピッチ、ボイシング、短期スペクトルなどの特徴を抽出して、一定のビット数 (たとえば700ビット/秒) に量子化(Quantisation)します。

図 1: 左が従来の無線デジタルスピーチシステム、右がRADE。



前方誤り訂正 (FEC Encode) は、符号化された音声ビットをビット誤りから保護するために余分なビット(訂正符号ビット)を追加します。前方誤り訂正 (FEC Encode) でエンコードされたビットは変調器(Modulator)に渡され、無線周波数(Radio Channel)上に送信できるア

ナログ信号を生成します。復調器(Demodulator)は受信した信号をビットに変換します。ビットの中にはエラーがあり、FECデコード (FEC Decode) は、そのエラーを修正しようとしています。最後に、ビットはボコーダ(De-Quantised)で音声特徴(量)に戻され、スピーチシンセサイザー (Speech Synth) で音声に合成されます。

RADEは斬新な工夫を凝らしています。RADEエンコーダ (RADE Encoder) の機能は、ボコーダから直接 PSK (Phase Shift Keyed) シンボルに変換します。これは、量子化、FEC Encode、符号化、変調を効果的に組み合わせたものです。RADEデコーダ(RADE Decoder) は、受信したPSKシンボルを、高品質のFARGAN合成器を使って、音声合成します。

RADEエンコーダ、RADEデコーダ、FARGAN合成器は、最新の機械学習技術 (ML) を使用して構築しています。RADEは、HF無線周波数に歪みがあっても高品質の音声を生成するように訓練されています。図 1には示していませんが、PSKシンボルをOFDM 信号に変換したり、OFDM信号からPSKシンボルに変換したりする従来の DSPと、同期のようなハウスキーピング・タスクがあります。PSKシンボルは2000シンボル/秒で無線周波数上に送信されます。

図 2: RADEエンコーダ PSKシンボルのコンステレーション・プロット。従来のQPSKと比較すると、コンステレーションはノイズのように見えます。

図 2: Scatter

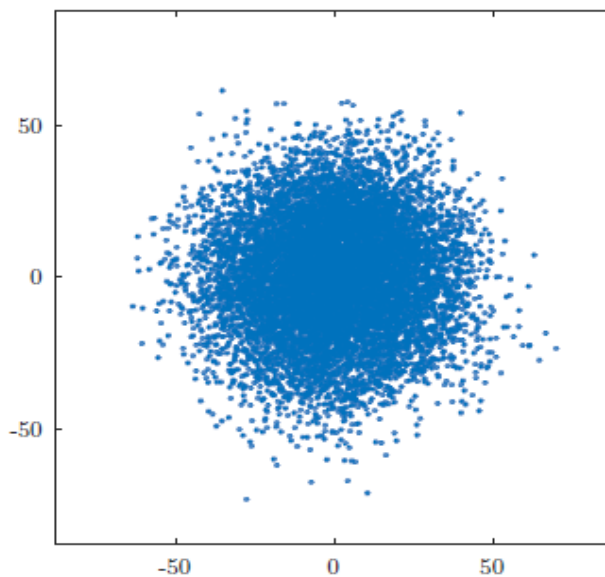
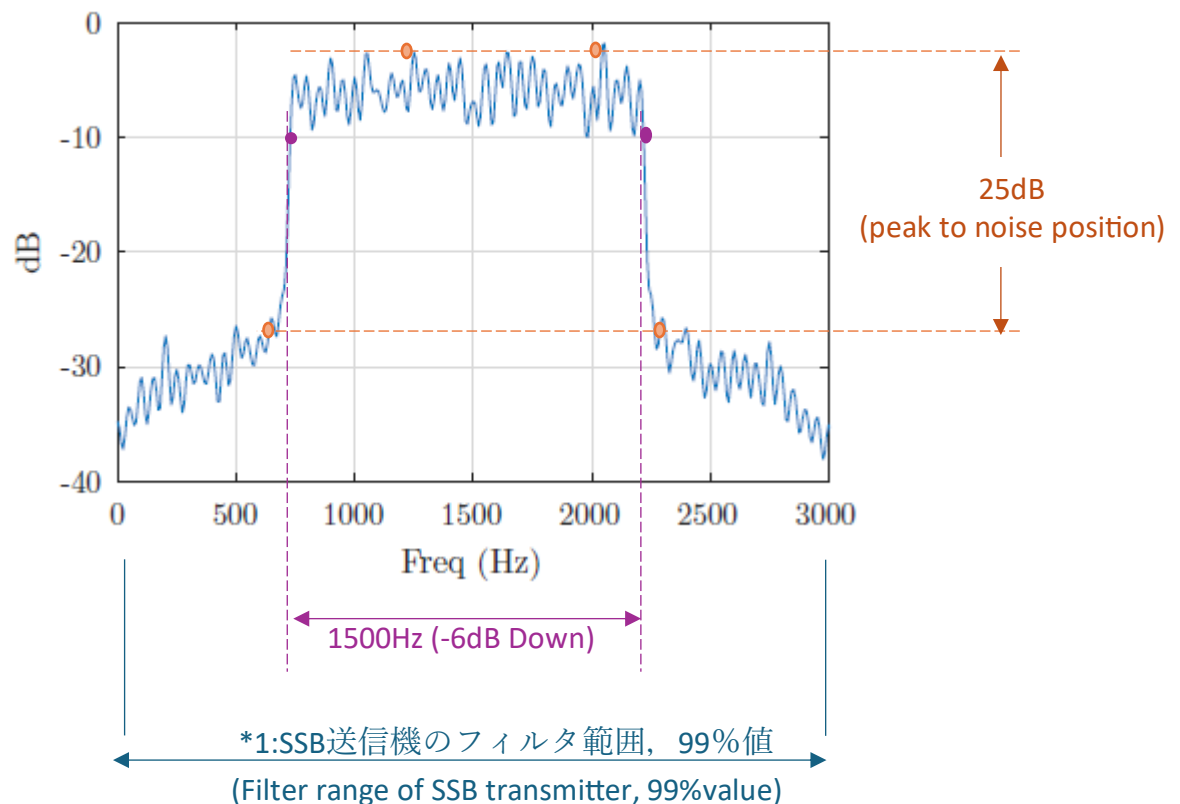


図2に示すようにRADE(RADE Encoder)のPSKシンボルは、従来のデジタルモデムのようには離散的なコンステレーションポイントではなく、ランダムに配置されているように見

えます。このコンステレーションは、HF無線周波数での多くの音声例を用いてオートエンコーダを訓練することによって、つくられたものです。ユニークなのは、RADEシステムはビット処理をしません。特徴抽出器（Feature Extraction）を通りPSKシンボル合成まで浮動小数点で処理します。つまり、RADE信号は、機械学習と古典的なDSP技術を組み合わせて作った、一種のアナログPSKと見ることができます。

図 3 はRADEV1信号のスペクトラムです。波形は他のOFDMと同様で、図のRF帯域幅は1500Hzです。スペクトルの高・低エッジの「ノイズ（grass）」までは、ピークから約-25dBと比較的高く、V1リリースではこの抑制が最適化されていません。

図 3: Spectrum of RADE V1 Signal.



注意参照（See Note）

3 波形概要(Waveform Description)

| パラメータ | 値 | コメント |
|--------------------|-------------|--|
| 音声帯域 | 100-7900 Hz | |
| RF帯域幅 (-6dB値) | 1500 Hz | ピークから-6dBの位置で1500Hz |
| (99%値) See Note.*1 | 3000Hz | SSBは3Khz以内 (技適)、TXフィルタで1.5Kまで制限可能 (TX SSB filter is used, limited to 1500 Hz by TX filter.) |
| 変調方式 | OFDM | 離散時間 , continuously valued PSK symbols |
| フレームサイズ | 120ms | アルゴリズムによる遅延 |
| ボコーダ | FARGAN | 低CPU機械学習ボコーダ |
| パイロード シンボルレート | 2000 Hz | 全サブキャリアの合計 |
| サブキャリア 数 | 30 | |
| サブキャリアシンボルレート | 50 Hz | |
| サブキャリア間隔 | 50 Hz | |
| サイクリックプリフィックス | 4ms | |
| ピーク対平均電力比 PAPR | < 1dB | |
| SNR 閾値 (AWGN) | -3dB | AWGNチャネル, ノイズ帯域幅 3000 Hz |
| C/No 閾値 (AWGN) | 32 dBHz | AWGNチャネル |
| SNR 閾値 (MPP) | 0 dB | Multipath Poor (MPP) channel (ドップラ周波数1Hz, 伝搬遅延 2ms), ノイズ帯域幅 3000 Hz |
| C/No 閾値 (MPP) | 35 dBHz | |
| 最悪時の周波数 | MPD | Multipath Disturbed (MPD) channel (ドップラ拡散2Hz, 伝搬遅延 4ms, 2パスWattersonモデル) |
| アクイジション時間 | < 1.5s | 0dB SNR MPP channel |
| アクイジション周波数 | +/- 50 Hz | |
| アクイジション隣接妨害耐性 | -3dBC | 平均アクイジション時間が2秒以下となる正弦波干渉レベル |
| 補助テキストチャネル | 25 bits/s | RADE V1は全ての補助ビットが同期に使用され、テキストに使用できるビットはない |
| SNR 測定 | 不可 | |

表 1: RADE V1の波形とパフォーマンス・パラメーター

参考資料(Reference)

FreeDV-036 Radio Autoencoder (RADE) V1 Introduction and Waveform Description

https://github.com/drowe67/radae/blob/dcd33aa142f5e418e82f1d3d1873d081c2f5c39d/doc/rade_intro_waveform.pdf

Watterson Channel Model for gnuradio

<https://github.com/noahthurston/gr-watterson>

FARGAN Vocoder

<https://arxiv.org/html/2405.21069v1#S2>

注意 (Note.)

*1：送信帯域幅の99%値は、送信機のフィルタ特性により異なります。技術基準適合機種以外の場合は、個別に確認が必要です。TXフィルタを使用することで、帯域幅を最小1.5KHzにすることができます。SSB無線機（技適）では3KHz以内を想定しています。

*1:The 99% value of the transmit bandwidth varies depending on the filter characteristics of the transmitter. For other than technically compliant models, it is necessary to confirm the value individually. The bandwidth can be reduced to a minimum of 1.5 KHz by using a TX filter. SSB radio (technical compliance) assumes a range within 3 KHz