

Schnellere Datenübertragung ohne Data-Port

Beitrag von „Sys_RoBOTer“ vom 5. Dezember 2020, 00:00

[Zitat von Hamspirit.de](https://www.hamspirit.de)

Wer schnelle Datenübertragung mittels eines FM-Funkgerätes durchführen wollte, war bisher darauf angewiesen, dass das Funkgerät einen sogenannten „Data-Port“ zur Verfügung gestellt hat. Diese Schnittstelle, auch „[9600-Port](#)“ genannt, umgeht die ansonsten bei einem Mikrofon- oder Lautsprecher-Anschluss vorhandenen Bandpässe sowie die bei FM anzuwendende [Preemphasis](#) bzw. Deemphasis.

[IMG: https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/SAM_2386.cropped-576x384.jpg]

Datenport auf der Rückseite eines Transceivers (hier: [Yaesu FT-450D](#))

70er-Jahre-Technik

Wenn lediglich ein Mikrofon- und Lautsprecher-Anschluss am FM-Funkgerät zur Verfügung steht, ist der übliche Betriebsmodus für Daten eine Übertragung mit 1200 Bit/s nach dem [Bell-202-Standard](#), der aus den 70er Jahren stammt. Bei dieser Betriebsart handelt es sich um eine Frequenzumtastung, bei der jeweils eine von zwei Frequenzen (1200 und 2200 Hz) gesendet und mittels FM moduliert wird, um ein Bit zu übertragen. Das ganze passiert ohne Fehlerkorrektur, das heißt, dass bei einem fehlerhaft übertragenen Bit unter Umständen das gesamte übertragene Paket ungültig werden kann. So würde z.B. im Falle eines [AX.25](#) oder TCP/IP-Paketes die Prüfsumme nicht mehr stimmen und das ganze Paket verworfen werden.

[IMG: https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/SAM_2375.cropped.lightness-576x384.jpg]

Ein Hardware-TNC, welcher den Bell-202-Standard umsetzt.

Auf der Suche nach neuen Möglichkeiten

Ich habe mich auf die Suche nach alternativen Übertragungsmöglichkeiten gemacht, die diese Beschränkungen aufheben können. Das [Shannon-Hartley-Theorem](#) zeigt klare Grenzen auf, wenn es darum geht hohe Datenraten (gemessen in Bit/s) trotz geringer Bandbreite (gemessen in Hertz), übertragen zu wollen: Wenn die Bandbreite kleiner wird, schnellst irgendwann der notwendige Signal-Rausch-Abstand in die Höhe und damit auch die benötigte Sendeleistung. Doch bei einer FM-Übertragung ist die HF-

Bandbreite größer als die NF-Bandbreite. In Bezug auf den Signal-Rausch-Abstand des übertragenen HF-Signals bei einer bestimmten Datenrate gilt zunächst dessen Bandbreite. Diese beträgt bei Schmalband-FM ca. 12,5 kHz, lässt also, zumindest der Theorie nach, durchaus Raum für schnellere Datenraten als 1200 Bit/s.

Trotz der höheren HF-Bandbreite stehen bei einem FM-Transceiver mit Audioanschluss nur wenige Kilohertz NF-Bandbreite zur Verfügung. Es ist daher nicht möglich, die Baudrate beliebig zu erhöhen. Bei der Baudrate handelt es sich um die Anzahl der Symbole pro Sekunde. Bei einem binären Übertragungsverfahren (z.B. BPSK) ist die Baudrate gleich der Datenrate in Bit/s. Bei QPSK hingegen werden pro Symbol zwei Bits übertragen, da die Phase einen von vier möglichen Zuständen annehmen kann. Die Datenrate (in Bit/s) ist damit doppelt so groß wie die Baudrate (in Symbolen pro Sekunde). Dieses Prinzip lässt sich noch weiter treiben: Bei 8PSK werden je Symbol 8 mögliche Zustände (also 3 Bit) übertragen, bei QAM16 sind es schon 16 mögliche Zustände (entsprechend 4 Bit).

Es stellt sich die Frage, warum man die Datenrate somit nicht beliebig erhöhen kann. Grund hierfür ist, dass je mehr unterschiedliche Symbole verwendet werden (z.B. unterschiedliche Phasenlagen oder unterschiedlich hohe Amplituden, die bei der Demodulation unterschieden werden müssen), umso anfälliger ist das Verfahren für Störungen durch Rauschen. Der Zugewinn an Geschwindigkeit nimmt bei höherwertigen Modulationen schnell ab, da für jedes weitere pro Symbol übertragene Bit die Anzahl der unterschiedlichen möglichen Symbole verdoppelt werden muss. Entsprechend steigt auch das benötigte Signal-Rausch-Verhältnis exponentiell.

Die Probe aufs Exempel

Bei ersten Experimenten auf dem 2m-Band hat sich herausgestellt, dass bei einer der NF-Bandbreite angemessenen niedrigen Baudrate von 960 Baud eine höherwertige Quadraturamplitudenmodulation mit 6 Bit pro Symbol, d.h. 64 verschiedene Symbole (QAM64), auch bei nicht perfekten FM-Verbindungen erfolgreich übertragen werden können. Das entspricht einer Netto-Datenrate von 3600 Bit/s. Dass hier eine solche Modulation noch funktioniert ist vermutlich dem Umstand zu verdanken, dass die Frequenzmodulation durch ihre höhere HF-Bandbreite und Art der Modulation die NF-Rauschleistung gering hält, sofern noch genug Signalstärke vorhanden ist. Allerdings ist es bei höherwertiger QAM erforderlich, die Intersymbolinterferenz, also die Auswirkung eines gesendeten Symbols auf die jeweiligen vor- und nachfolgenden Symbole, so gering wie möglich zu halten. Nur so können die feinen Unterschiede der Vielzahl von möglichen Symbolen noch erkannt werden. Dies habe ich durch eine lange Umschaltzeit zwischen den Symbolen erreicht. Zusätzlich wird mittels einer Vorwärtsfehlerkorrektur sichergestellt, dass einzelne Bitfehler, sofern diese dennoch auftreten, korrigiert werden können.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/qam64-signal-labeled-576x445.png>]

Betrachtung des modulierten Signals mittels Export in eine WAV-Datei und Öffnen mit einem Audibearbeitungsprogramm (hier: [Audacity](#)). Es ist zu sehen, dass harte Sprünge vermieden werden.

Fehlerkorrektur à la FT8

Für die Vorwärtsfehlerkorrektur liegt es nahe, das moderne Verfahren einer [dünnbesetzten Prüfmatrix](#) (englisch: „low-density parity-check matrix“, auch „LDPC matrix“) anzuwenden. Dieses kommt auch beim derzeit sehr beliebten [FT8](#) zur Anwendung. Allerdings ist bei FT8 die Paketgröße mit 174 Bit brutto bzw. 87 Bit netto fest vorgegeben.

Wenn es jedoch um die Übertragung von Datenpaketen geht, die länger als bei FT8 üblich (knapp 11 Byte je Durchgang) sind, ist die Größe der bei FT8 verwendeten Prüfmatrix zu klein und daher nicht optimal. Idealerweise sollte bei Verwendung von LDPC-Matrizen die Matrix die gleiche Größe haben, wie das zu übertragende Datenpaket. Dies ist allerdings bei Paketen unterschiedlicher Länge, wie z.B. bei [AX.25](#), unpraktisch, da für jede Paketlänge eine eigene Matrix hinterlegt werden müsste. Für die Praxis schien daher eine Matrix mit 128 Byte (also 1024 Bit) Nutzdaten geeignet. Dies erfordert jedoch größere Datenpakete auf mehrere Blöcke aufzuteilen. Um zu vermeiden, dass Burstfehler einen der übertragenen Blöcke unleserlich machen, kann das Datenpaket derart verzahnt auf die einzelnen Blöcke verteilt werden ([Interleaving](#)), dass solche Fehler nach Möglichkeit korrigierbar bleiben.

Um trotz der festen Blockgröße eine effizientere Bandnutzung zu ermöglichen, können durch eine sogenannte [Punktierung](#) einzelne Blöcke verkleinert werden. Somit ist es möglich, dass im letzten Block nicht alle Fehlerkorrekturbits übertragen werden müssen, falls dieser nicht komplett mit Nutzdaten gefüllt ist.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/block-decoder-576x643.png>]

Die Funktion `pktfec_decode_block` ist das Herzstück der LDPC-basierten Fehlerkorrektur

Tatsächlich habe ich mich für die Verwendung einer eigenen LDPC-Matrix mit einer [Code-Rate](#) von 2/3 entschieden, so dass 128 Byte Nutzdaten jeweils 64 Byte Fehlerkorrekturdaten hinzugefügt werden. Zur Erzeugung einer entsprechenden Matrix griff ich auf eine Software des mittlerweile emeritierten Professors [Radford M. Neil](#) der Universität von Toronto (Department of Statistics, Department of Computer Science) zurück, der freundlicherweise eine frei nutzbare Software zum [Erstellen von LDPC-Matrizen](#) veröffentlicht und unter einer liberalen Open-Source-Lizenz zur kostenlosen

Nutzung freigegeben hat. (An dieser Stelle ein ausdrückliches Danke an ihn!)

Eine Software zum Download

All meine Überlegungen habe ich wiederum meinerseits in eine Open-Source-Software einfließen lassen und stelle diese ebenso der Allgemeinheit zur kostenlosen Nutzung zur Verfügung. Die Software heißt „[pktfec-tnc](#)“ und kann auf einem Linux-Computer installiert werden. Gestartet stellt diese einen KISS-Server zur Verfügung, der als Software-TNC (Terminal Node Controller) fungiert. Das [KISS-Protokoll](#) ist eine bei Amateurfunksoftware übliche Schnittstelle, die es ermöglicht, den TNC mit einer Vielzahl bereits vorhandener Programme zu verwenden, ohne dass eine Anpassung notwendig ist.

In der Standardkonfiguration wird QAM64 bei einer Hilfsträgerfrequenz von 1920 Hz und einer Baudrate von 960 Symbolen pro Sekunde verwendet. Da durch die Quadraturamplitudenmodulation (QAM) weit mehr als ein Bit pro Sekunde übertragen werden kann, erreicht die Software in Standardkonfiguration eine Netto-Übertragungsrate von 3600 Bit/s bei einer NF-Bandbreite von nur ca. 1,9 kHz (erste Nullstellen des NF-Spektrums bei 960 Hz und 2880 Hz). Die Brutto-Übertragungsrate beträgt 5760 Bit/s. Allerdings ist jedes 16. Symbol konstant und dient der Aufrechterhaltung der Synchronisation und enthält keine Information. Damit können etwaige Phasenabweichungen über die Laufzeit einer Sendung korrigiert werden. Von den verbleibenden 5400 Bit/s steht dann ein Drittel für Fehlerkorrektur zur Verfügung, so dass sich die Netto-Datenrate von 3600 Bit/s ergibt.

[IMG: <https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/qam64-spektrum-576x301.png>]

In der [Frequenzanalyse](#) eines mit pktfec-tnc (in Standardeinstellungen) erzeugten NF-Signals sieht man Nullstellen bei 960 Hz und 2880 Hz. Frequenzen darunter bzw. darüber sind bereits deutlich gedämpft, und Frequenzen ab 3500 Hz sind noch stärker gedämpft.

Da die Parameter der Software veränderbar sind, lassen sich sowohl niedrigere als auch höhere Datenraten erzielen. In ersten Feldtests schien bei guter Verbindung auch QAM256 mit einer Netto-Übertragungsrate von 4800 Bit/s trotz fehlendem Daten-Port am Transceiver noch zuverlässig zu funktionieren, sofern die Funkverbindung hinreichend gut war. Dabei ist es allerdings unbedingt notwendig, den NF-Pegel (und damit den Frequenzhub) exakt auszusteuern. Ist der Pegel zu niedrig, so können die unterschiedlichen Symbole nicht korrekt unterschieden werden. Ist der Pegel zu hoch, so kommt es zu [Übersteuerung \(Clipping\)](#), bei dem die Symbole ebenfalls nicht mehr unterschieden werden können. Der Bereich, in dem die Übertragung zuverlässig funktioniert, ist ggf. sehr schmal. Es gilt daher: Pegel so hoch wie möglich, jedoch so niedrig wie nötig einstellen.

Maximalgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Geräten

Auf dem Experimentiertisch waren mit einem [Baofeng UV-5R](#) und einem [TYT MD-380](#) auch Netto-Übertragungsraten von bis zu 5000 Bit/s (entsprechend einer Brutto-Übertragungsrate von 8000 Bit/s) machbar. Zum Vergleich: Die Übertragungsrate bei schnellem Packet-Radio beträgt üblicherweise 9600 Bit/s. Dies setzt jedoch zwingend einen Daten-Port voraus, welcher an vielen günstigen Funkgeräten nicht vorhanden ist. Das neue Verfahren hingegen sollte grundsätzlich mit jedem FM-Funkgerät verwendet werden können, dass über einen Lautsprecher- und Mikrofonanschluss verfügt. Hierdurch sind schnellere Datenverbindungen nun auch mit Handfunkgeräten der untersten Preisklasse um €20 möglich.

[IMG: https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/SAM_2381.stripped-576x384.jpg]

Das Baofeng [UV-5R](#) ist für ca. €20 erhältlich, verfügt jedoch wie viele billige FM-Transceiver nicht über einen 9600-Datenport.

Trotz der geringen Audio-Bandbreite des neuen Verfahrens schien die schnelle Übertragung mit einigen Funkgeräten weniger gut zu funktionieren. Die Kombination [Albrecht AE 2990 AFS](#) als Transmitter und einem [Yaesu FT-450D](#) als Empfänger lieferte schlechtere Ergebnisse. Hier war in einem ersten Laborversuch bereits bei 3000 Bit/s Nettoübertragungsrate (4800 Bit/s brutto) Schluss, bei etwas gestörtem Kanal funktionierten nur 1500 Bit/s netto (2400 Bit/s brutto).

Da bei dieser Kombination auf dem 10m-Band gearbeitet wurde, sind die Ergebnisse nur bedingt mit den zuvor erwähnten Experimenten auf dem 2m-Band vergleichbar, denn beim 10m-Band gelten strengere Anforderungen an die HF-Schmalbandigkeit (vergleiche [Bandplan](#) und Amateurfunkverordnung, [Anlage 1](#)). Somit ist neben einem geringeren Frequenzhub auch mit einer niedrigeren Grenzfrequenz im Tiefpass des Audiosignals zu rechnen. Entsprechend musste die Hilfsträgerfrequenz auf 1600 Hz und die Baudrate auf 800 Baud reduziert werden, damit QAM64 mit einer Nettoübertragungsrate von 3000 Bit/s noch möglich war. Es wäre aber auch ein Nichtlinearer [Phasengang](#) des Albrecht Handfunkgerätes als Ursache für ein Übersprechen zwischen den Signalen denkbar, denn bei einem nichtlinearen Phasengang kommt es zu unterschiedlichen [Gruppenlaufzeiten](#) von Signalanteilen unterschiedlicher Frequenzen. (Das Yaesu-Gerät wurde in diesem Test am Data-Port betrieben, weshalb Nichtlinearitäten seitens des Empfängers nicht zu erwarten waren.)

Den Versuch, das Experiment in umgekehrter Senderichtung zu wiederholen, konnten wir nicht durchführen, da gerade kein passendes Kabel für den Mikrofonanschluss des FT-450D zur Hand war. In diesem Moment stellten wir außerdem fest, dass es (zumindest unserem Kenntnisstand nach) mit dem FT-450D nicht möglich zu sein scheint, im FM-Modus Audio-Daten über den Data-Port zu senden, sondern mit diesem

Anschluss auf der Rückseite nur USB, LSB oder RTTY-Betrieb möglich ist (vergleiche Seite 74 bis 77 im [Benutzerhandbuch](#)).

Alte Begrenzungen aufheben?

Im Fragenkatalog der Bundesnetzagentur zu technischen Kenntnissen im Amateurfunk lautet die Prüfungsfrage TG203 (Klasse E) bzw. TE310 (Klasse A): „Welche Anforderungen muss ein FM-Funkgerät erfüllen, damit es für die Übertragung von Packet Radio mit 9600 Baud geeignet ist?“ Die richtige Antwort beginnt mit: „Es muss sende- und empfangsseitig den Frequenzbereich von 20 Hz bis 6 kHz möglichst linear übertragen können [...]“.

[IMG: https://www.hamspirit.de/wp-content/uploads/2019/02/SAM_2379.cropped.lightness-576x384.jpg]

Prüfungsfrage TG203 im Fragenkatalog der Klasse E

Es wäre schön, wenn sich diese Beschränkung in Zukunft lösen ließe und 9k6-Datenverbindungen auch mit billigeren FM-Transceivern möglich wären.

Luft nach oben

Mit der Software pktfec-tnc habe ich einige Techniken ausprobiert, die diesem Ziel näher zu kommen scheinen. Ob es sich hierbei um den besten Ansatz handelt, weiß ich nicht; ich möchte aber mit meinem Beitrag zu weiteren Experimenten anregen.

Schon jetzt wurde gezeigt, dass 4800 Bit/s (netto) mit einem €20 Gerät trotz fehlendem Datenport durchaus machbar sind.

Ich glaube, dass es trotzdem noch „Luft nach oben gibt“, denn so wird beispielsweise die zur Vermeidung von Intersymbolinterferenz eingeführte Umschaltzeit zwischen den Symbolen derzeit vom Demodulator vollständig ignoriert, obwohl diese 50% der Übertragungszeit ausmacht. Gelänge es, auch diese Zeit noch zu nutzen, um die Fehlerrate im Demodulator zu senken, könnte das Verfahren noch besser werden.

Alternativ, falls der Demodulator diese Umschaltzeit auch zukünftig nicht verwenden wird, könnte der Modulator anstelle cosinusförmiger Umtastung (wie derzeit implementiert) ein komplexeres Verfahren unter Einbeziehung weiterer benachbarter Symbole verwenden, welches die benötigte NF-Bandbreite bei gegebener Baudrate vielleicht weiter reduziert. Dies könnte eine Erhöhung der Baudrate und damit der Datenrate (bei ähnlicher NF-Bandbreite) ermöglichen.

Ebenso ließe sich durch ein definiertes Initialisierungssignal der Übertragungskanal bei jedem Empfänger einer Sendung ausmessen. Unterschiede im Amplituden- und Frequenzgang (und damit bei nichtlinearem Phasengang auch Unterschiede in der

Gruppenlaufzeit von Signalanteilen unterschiedlicher Frequenz) ließen sich dann ggf. mittels eines dynamisch errechneten [digitalen Filters](#) ([Equalizer](#) und/oder [Allpass](#)) ausgleichen.

Die Zukunft der Kommunikationstechnik mitgestalten

Auch wenn all dies erst einmal Ideen sind, kann schon jetzt mit pktfec-tnc experimentiert werden. Die Software kann unter <https://www.public-software-group.org/pktfec-tnc> heruntergeladen werden. Die liberale Lizenz ermöglicht jedem Funkamateur beliebige Anpassungen vorzunehmen und diese auch zu nutzen. Auch einer kommerziellen Verwendung stehe ich positiv gegenüber, denn ich würde mich freuen, wenn auch Unternehmen von Ideen oder konkreten Implementierungen aus dem Amateurfunk profitieren. So kann der als Hobby betriebene Amateurfunk die Entwicklung zukünftiger Kommunikationstechnik mitgestalten.

Dieser Artikel erschien zuerst im März 2019 in der gedruckten Ausgabe unseres Magazins.

Alles anzeigen

Quelle: <https://www.hamspirit.de/10904...ertragung-ohne-data-port/>