

Ergänzung zum Beitrag in FA 8/22, S. 622 f. „CW-Minisender für 2,4 GHz zum Betrieb über QO-100“

Ergänzend zum Beitrag präsentieren wir hier noch Informationen, die in der gedruckten Ausgabe keinen Platz mehr fanden.

■ LoRa-Technologie

LoRa ist einfach die Abkürzung für *Long Range* – ein kommerzieller Name, der sich weit verbreitet hat und der bedeutet, dass eine größere Reichweite der Datenkommunikation erreicht wird. In der Praxis bedeutet dies, dass in ISM-Bereichen mit gesetzlichen Grenzwerten für die Ausgangsleistung eine bis zum Zehnfachen oder noch größere Kommunikationsreichweiten im Vergleich zu Standard-Datenmodulationen wie FSK oder OOK (On-Off-Keying = CW) erzielt werden. Dies ist in vielen praktischen Anwendungen sehr nützlich und kommerziell attraktiv.

Bei der LoRa-Technologie wird dies durch die Technik der Spreizung des Signals auf ein breiteres Band, das sogenannte *Spread Spectrum*, erreicht. Das Datensignal mit begrenzter Bandbreite wird mit der bekannten sogenannten Spread-Sequenz mit viel höherer Bandbreite multipliziert, was praktisch zu Rauschen führt.

Auf der Empfängerseite wird das empfangene Breitbandsignal mit einer gut synchronisierten, lokal erzeugten Replik der Spread-Sequenz multipliziert, wodurch das Originalsignal entsteht. Diese Methode steht im Einklang mit der Theorie, die besagt, dass es zur Erhöhung der Kommunikationsreichweite notwendig ist, die Bandbreite des übertragenen Signals zu erhöhen und/oder seine Geschwindigkeit zu verringern [1].

LoRa-Technologie nutzt das sogenannte Chirp-Spread-Spektrum, das bereits in den 1940er-Jahren für Radaranwendungen eingesetzt wurde. Chirp (Pfeifen) ist eine lineare Änderung der Frequenz in der Zeit vom Minimum zum Maximum, das bedeutet, dass es relativ einfach erzeugt und rekonstruiert werden kann, anscheinend waren die Röhren in der Lage, das zu schaffen. Der Trick bei der LoRa-Modulation ist, dass die Daten in Sprüngen zwischen einzelnen Chirps codiert werden. Die grundlegenden Parameter, die die Geschwindigkeit einer solchen Datenübertragung bestimmen, sind:

- BW: resultierende Bandbreite des Spread-Signals
- SF: Spreading Factor; Geschwindigkeit, mit der sich der Chirp ändert; je höher

der SF-Wert ist, desto langsamer die Frequenzänderung

- CR: Coding Rate; da LoRa-Technologie auch die so genannte *Forward Error Coding* (redundante codierung) verwendet, um die Kommunikationsreichweite weiter zu verbessern, wirken sich dessen Parameter ebenfalls auf die resultierende Geschwindigkeit aus.

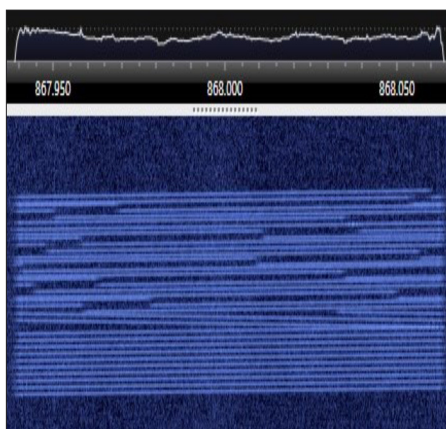


Bild A1: Wasserfalldarstellung eines LoRa-Pakets auf 868 MHz, Spreading Factor SF = 12, Bandbreite BW = 125 kHz
Screenshot: OM2JU

Die Demodulation des Spread-Spektrum-Signals erfolgt durch Korrelationstechnik, d. h. Multiplikation des empfangenen Signals mit einer lokal erzeugten Replik des Chirps. Auf diese Weise werden die in Chirps codierten Daten hervorgehoben und umgekehrt werden die üblichen Störsignale mit konstanter Frequenz gespreizt und gehen im Rauschen unter. Der Begriff Chirp Spread Spectrum kann durch den Begriff LoRa-Modulation ersetzt werden, der oft im Zusammenhang mit dieser Technologie verwendet wird.

Um ein typisches LoRa-Paket zu veranschaulichen, habe ich versucht, das Signal mit dem Programm *SDR Console* als Wasserfall zu erfassen. Dazu habe ich den Schaltkreis SX1262 verwendet, der im 868-MHz-Band arbeitet. Diese Frequenz kann auch mit einem *RTL-SDR-Dongle* aufgezeichnet werden. Die Parameter der LoRa-Modulation habe ich auf das sich am langsamsten ändernde Signal eingestellt, d. h. maximal möglicher *Spreading Factor* SF = 12, und minimal mögliche Bandbreite BW = 12 kHz. Da auch in diesem Fall die Dauer eines Pakets in der Größenordnung von Hunderten von Millise-

kunden liegt, musste ich die SDR-Konsole auf die maximale Geschwindigkeit des Wasserfalls einstellen. Bild A1 zeigt die aufgezeichnete Sequenz. Es ist die beste Qualität, die ich mit dieser preiswerten Einrichtung erreichen konnte. Zu Beginn sehen wir eine Präambel, die aus mindestens acht Up-Chirps (mit steigender Frequenz) besteht, gefolgt von einer Sequenz von zwei Down-Chirps, später nur noch Up-Chirps mit charakteristischen Diskontinuitäten der codierten Daten. Der Empfänger verwendet die Präambel, um den Beginn des Pakets zu identifizieren und den Chirp-Replik-Generator für die Dekodierung zu kalibrieren.

Die LoRa-Modulation kann von Funkamateuren in verschiedenen Punkt-zu-Punkt-Kommunikationsanwendungen eingesetzt werden, bei denen es nicht notwendig ist, große Datenmengen zu übertragen, z. B. Überwachung, Telemetrieübertragung, Antennenwechsel, Rotatorsteuerung. Es gibt viele Beispiele dieser Art, wobei darauf geachtet werden muss, die Kommunikation auf der Anwendungsebene zu sichern, obwohl es heute noch schwierig ist als bei anderen Modulationsarten, LoRa-Rohdaten zu entschlüsseln.

LoRa-APRS ist ein weiteres Beispiel für die Nutzung der Vorteile der Kommunikation über große Entfernungen. Bewegliche oder ortsfeste Knoten übertragen in regelmäßigen Abständen Positionen und Telemetriepakete mit LoRa-Modulation. Ein System fester, mit dem Internet verbundener Gateways, empfängt diese Informationen und speichert sie auf einem Server. Dieses System verwendet ein leicht abgewandeltes LoRa-Paketformat und der Empfang erfolgt ohne Bestätigung, sodass der Knoten nur Senden muss.

Dieses System wurde von Funkamateuren in Österreich entwickelt und erfreut sich heute großer Beliebtheit. Es gibt eine koordinierte Frequenz von 433,775 MHz für diesen Dienst in Europa. Was die Hardware betrifft, so werden preiswerte und beliebte 433-MHz-LoRa-Module für Gateways [2] und Tracker [3] verwendet.

Im Zusammenhang mit sich bewegenden Signalquellen ist eine weitere schöne Eigenschaft der LoRa-Modulation praktisch – die Robustheit gegenüber Dopplereffekten auf der Empfängerseite. Dies macht die LoRa-Technologie auch bei Da-

ten- und Telemetrieübertragungen vieler neuer Cubesat-Projekte (<https://tinygs.com>) beliebt.

LoRaWAN ist ein höheres Protokoll, das auf der LoRa-Modulation basiert und mit Blick auf geringe Stromaufnahme, Sicherheit, Kosten und Skalierbarkeit entwickelt wurde. Die Endgeräte sind sehr einfach, während sich die Komplexität auf die sogenannten Gateways verlagert, die die Konnektivität mehrerer Endgeräte mit dem Internet und weiter mit den Netzwerk- und Anwendungsservern gewährleisten.

Hier ist die sogenannte *Duty-Cycle*-Regel zu erwähnen, die eine Sendezeit eines bestimmten Knotens mit einem maximalen Anteil von 1 % erlaubt. Auf diese Weise wird die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen minimiert und es ist möglich, eine große Anzahl von Endknoten mit nur einem Tor zu bedienen. Der *Duty-Cycle*-Test ist Teil der LoRaWAN-Zertifizierung. Weitere Details über LoRaWAN würden den Rahmen dieses Beitrags sprengen, falls jemand Interesse hat, gibt es ein gutes Erklärvideo von unserem Freund HB9BLA [4].

Filterung (GFSK) im Sender zur Erhöhung der Robustheit dieser Modulation.

– FLRC: (*Fast Long Range Communication*) ist eine spezielle Version von GFSK, die mit redundanter Datencodierung ergänzt wird, was die Robustheit der Kommunikation und die Reichweite weiter erhöht

– LoRa: Das Modem unterstützt die die Chirp-Spread-Spectrum-Modulation, die ebenfalls durch redundante Datencodierung ergänzt wird. Dieses Modem hat die höchste Empfindlichkeit und die größte Kommunikationsreichweite.

Im Empfangsmodus übernimmt die *Packet Engine* die Decodierung der demodulierten Daten und das Ablegen im Datenspeicher. Je nach gewählter Modulationsart kann dieser Prozess zusätzliche Datenoperationen, wie das sogenannte *De-Whitening*, die CRC-Verifizierung oder die FEC-Decodierung umfassen. In ähnlicher Weise aber umgekehrter Richtung läuft dieser Prozess beim Senden ab.

In der SX1280-Variante ist das LoRa-Modem mit der Möglichkeit ausgestattet, die

bilität wünscht, der muss einen TCXO einsetzen. Die Auflösung der PLL beträgt:

$$FREQ-STEP = \frac{52 \text{ MHz}}{2^{18}} = 198,364 \text{ Hz}$$

Das ist ein relativ großer Wert, aber für CW-Verbindungen über QO-100 noch akzeptabel.

Der Endstufenblock (PA) erlaubt die Einstellung der Sendeleistung in 32 Stufen von -18 dBm bis 12,5 dBm. Aufgrund der Komplexität der Schaltung und der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Blöcken bietet der Hersteller vorgefertigte Konfigurations- und Ausführungsfunktionen an, die im Datenblatt dokumentiert sind.

Die Schaltung ist außerdem auf eine geringe Stromaufnahme ausgelegt und für batteriebetriebene Anwendungen gedacht. Daher lassen sich alle Blöcke, einschließlich der PLL, bei Bedarf ein- bzw. ausschalten. Allerdings ist die Zeit zuberückichtigen, die für die Aktivierung des jeweiligen Blocks aus dem Energiesparmodus erforderlich ist. Einzelheiten sind im Datenblatt [5] beschrieben, *Figure 10-1: Transceiver Circuit Modes*.

Um ein CW-Signal zu erzeugen, wird einfach die Funktion *SetTxContinuousWave()* verwendet. Ein SSB-Signal könnte man durch kontrollierte Änderungen der Frequenz und der Ausgangsamplitude des Signals erzeugen, ähnlich wie beim KW-Transceiver-Projekt *uSDX*. Allerdings gibt es eine Einschränkung, die diese Implementierung wahrscheinlich sehr schwierig machen wird: Da die PLL-Auflösung 198,364 Hz beträgt, ist die PLL-Dynamik fragwürdig. Außerdem ist die Auflösung der Ausgangsamplitude aufgrund der 32 Schritte ebenfalls sehr gering.

In dem im Beitrag beschriebenen SX1281-QO100-TX wird keine LoRa-Modulation verwendet und der Empfängerteil ist überhaupt nicht aktiviert. Die detaillierte Beschreibung und Diskussion darüber sollte lediglich als Ausgangspunkt für das Verständnis und mögliche weitere Experimente mit der LoRa-Technologie in der Amateurfunkgemeinschaft dienen.

<http://qrz.com/db/om2ju>

Literatur und Bezugsquellen

[1] Semtech: AN1200.22, LoRa Modulation Basics: <https://web.archive.org/web/20190718200516/www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
 [2] Buchegger, P.: LoRa_APRS_iGate. https://github.com/lora-aprs/LoRa_APRS_iGate
 [3] Bauer, C. J., OE3CJB: TTGO-T-Beam LoRa-APRS. <https://github.com/oe3cjb/TTGO-T-Beam-LoRa-APRS>
 [4] Spiess, A., HB9BLA: LoRaWAN entmystifiziert. www.youtube.com/watch?v=hMOWbNUpDQA
 [5] Semtech: SX1281. www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-24ghz/sx1281

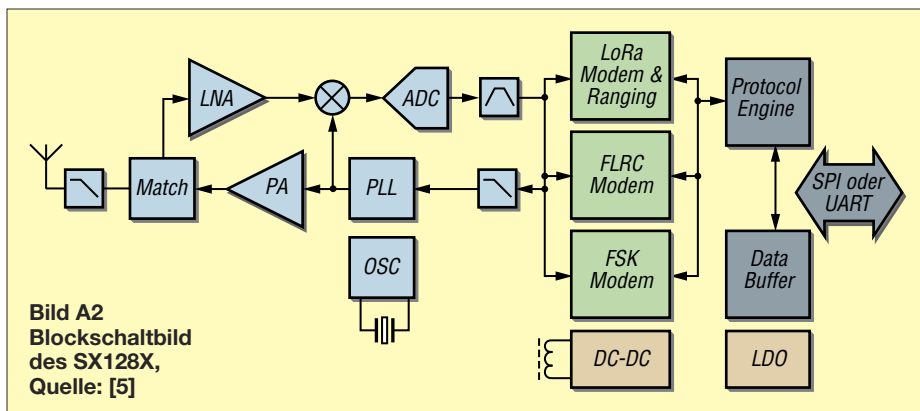


Bild A2
Blockschaltbild
des SX128X,
Quelle: [5]

■ Transceiver SX1281/SX1280

Das ist ein Transceiver, der für die digitale Kommunikation im 2,4-GHz-Band entwickelt wurden. Das Datenblatt [5] enthält ein Blockdiagramm und eine detaillierte Beschreibung der Funktionen und Parameter der einzelnen Blöcke, Bild A2. Auf den ersten Blick ist das SDR-Konzept offensichtlich: ein Empfänger mit analogem Abwärtskonverter und Basisbandsignalabtastung.

Es ist auch klar, dass es sich aufgrund der gemeinsamen Nutzung einiger Blöcke um ein Halbduplex-Konzept handelt. Somit kann man zu einem Zeitpunkt nur Empfangen oder nur Senden. Es werden drei Modulationsarten unterstützt, für jede ist ein eigener Block reserviert. Diese lassen sich konfigurieren und sie sind bei Verwendung der jeweiligen Modulationsart eingeschaltet:

– FSK: (*Frequency Shift Keying*) ist die Frequenzumtastung mit optionaler Gauß-

Entfernung zwischen zwei Geräten nach der *Time of Flight* genannten Methode zu messen. Dies geschieht mithilfe eines speziellen Pakets, das das Master-Gerät sendet und auf das das adressierte Slave-Gerät sofort antwortet. Das Master-Gerät wertet die zwischen Senden und Empfangen vergangene Zeit aus, die direkt proportional zur Entfernung zwischen beiden Geräten ist. Diese Methode hat aufgrund der Komplexität der Signalausbreitung ihre Grenzen und erreicht in der Praxis eine Genauigkeit von nicht mehr als 1 m, ermöglicht jedoch die Entwicklung interessanter Anwendungen.

Der Frequenzsyntheseblock (PLL) verwendet ein 52-MHz-Referenztakt. Die LoRa-Modulation wurde so konzipiert, dass sie mit preiswerten 20-ppm-Quarzen funktioniert. Ausnahme ist die Verwendung des *Spreading Factors* SF = 12, wo 10 ppm empfohlen werden. Wer eine bessere Sta-