Königsbach-Stein, im Juli 1996

Technologien zum Empfang breitbandiger Signalquellen auf Kurzwelle

Dipl.-Ing. Erich H. Franke, DK6II
Lenaustraße 20
D-75203 Königsbach-Stein 2
FAX: 07232-1647
email: 100634.2762@compuserve.com

Skriptum zum Vortrag anläßlich der 41. UKW-Tagung am 21.9.96 in Weinheim

1 Einführung

Nachdem auf den höheren Bändern breitbandig sendende Signalquellen häufig zu finden sind, beginnen diese, nun auch den Bereich der Kurzwellen, also die Domäne schmalbandiger Emitter mehr und mehr zu bevölkern.

Die immensen Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung, verbunden mit dem Wunsch der zumeist kommerziellen und hoheitlichen Nutzern nach automatischem Betrieb bei hoher Kanalverfügbarkeit und geringer Störbarkeit sind Gründe für die steigende Verbreitung.

Beispiele für breitbandige Signale sind

- Spreizaussendungen (Spread Spectrum Emissions)
- Frequenzsprungsignale (Frequency Hopping)
- Frequenzagile Sendungen (Chirp-, Sweep- und Stepping Emissions)

Der Wunsch nach breitbandigen Aussendungen ist durch die höhere Informationskapazität begründet, beispielsweise um höhere Datenraten für die Text- und Datenübertragung zu erreichen.

Ein weiterer Grund liegt darin, durch Erhöhung der Übertragungsbandbreite das Störverhalten zu verbessern, beispielsweise durch redundante Aussendungen (Diversity) oder durch Informationsspreizung.

Für militärische Nutzer kommt zudem noch der Aspekt einer geringeren Detektions- und Aufklärungswahrscheinlichkeit hinzu. So können eine Reihe breitbandiger Verfahren mit klassischen Schmalbandempfängern nicht oder nur unzureichend erfaßt werden. Man spricht in diesem Zusammenhang bereits von Signalen 'geringer Detektionswahrschenlichkeit' (low probability of intercept, LPI).

Nun sind nicht alle aus den höheren Bändern beziehungsweise aus der Satellitentechnik bekannten Breitband-Übertragungsverfahren für den Einsatz auf der Kurzwelle gleichermaßen geeignet. Dies liegt in den physikalischen Eigenschaften des Kurzwellenkanals selbst begründet [DigMod].

Auch dienen nicht alle breitbandigen Signale der Nachrichtenübertragung. Einige Signalquellen dienen auch Meß- und Kontrollzwecken, wie beispielsweise die später noch näher betrachteten 'Chirp-Sounder'.

Zur Detektion, Erfassung und Empfang derartiger Signale werden leistungsfähige, breitbandige Empfangseinrichtungen benötigt, die einen ganzen Frequenzausschnitt aufnehmen und analysieren können.

Wir werden uns die Grundlagen auf welchen derartige Systeme beruhen im folgenden Text näher ansehen.

2 Diskussion verschiedener breitbandiger Aussendungen

Wir wollen uns im folgenden mit drei Vertretern breitbandiger Signale näher beschäftigen. Signale dieser Art werden zunehmend auch von kommerziellen Funkdiensten oder von Datensystemen ausgestrahlt und können aufgrund ihres Charakters innerhalb der Amateurbänder beobachtet werden.

2.1 Spreizaussendungen (Spread Spectrum Emissions)

Freuqenzspreizverfahren werden bislang vor allem in der Satellitentechnik angewandt, beispielsweise bei der Signalübertragung im Global Positioning System (GPS) [GPSEinf]. Weitere Anwendungen sind sogenannte *Radio LAN*s, die beispielsweise im 2,4 GHz-ISM-Band zunehmend eingesetzt werden.

Im Gegensatz zu den später diskutierten *frequenzagilen* Systemen, handelt es sich bei der reinen Spread Spectrum-Übertragung eigentlich um ein Festfrequenzverfahren. Das bedeutet, daß sich der Schwerpunkt des belegten Frequenzbereiches in der Frequenz nicht verschiebt oder springt.

Satt dessen wird durch die Art der Modulation die zu übertragende Nutzinformation auf der Frequenzachse quasi verschmiert.

Die Nachrichtentheorie besagt, daß es bei der Übertragung eines Informationselementes auf dessen Energiegehalt ankommt. Die aktuelle Form des Spektrums ist dabei unerheblich. Gemäß dieser Annahme wäre es somit möglich, die Information unterhalb des Rauschens zu übertragen. Ein derartiges Signal könnte mit einem konventionellen Schmalbandempfänger nicht mehr detektiert werden. Dies hat auch bei der Störbarkeitsüberlegung erhebliche Konsequenzen. Wir werden dies gleich näher anschauen.

Im praktischen Einsatz werden gespreizte Signale durch Modulation der zu übertragenden Nutzinformation mit einer Pseudozufalls-Sequenz erzeugt (Direct Sequence Spread Spectrum). Digitale Pseudozufallsfolgen können beispielsweise sehr einfach durch rückgekoppelte Schieberegister erzeugt werden. In der Literatur, beispielsweise in [Knuth] werden andere Generatoren für den Einsatz als Zufallsgeneratoren (Random Generators) mittels Software beschrieben.

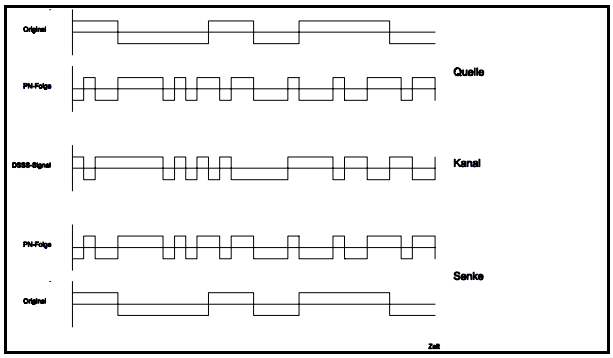

Abb. 1: Erzeugung von Spreizcodesendungen

Allen diesen Generatoren ist gemein, daß die von ihnen erzeugten Zufallsfolgen ähnliche Eigenschaften haben wie weißes Rauschen.

Die Zufallsfolgen können jedoch bei Kenntnis der Parameter, der Erzeugungspolynome und der Startwerte auf der sie beruhen jederzeit exakt reproduziert werden. Aus diesem Grund spricht man hierbei anschaulich von Pseudo-Zufallsfolgen (Pseudo-Noise, PN).

Wird nun eine Information mit einer derartigen Pseudo-Zufallsfolge verknüpft, so entsteht wiederum eine Zufallsfolge, in der das Originalsignal nicht mehr ohne weiteres sichtbar ist und deren Bandbreite im wesentlichen durch die Bandbreite der PN-Folge bestimmt wird.

Am Beispiel des GPS-Systems wird die Nutzinformation, die mit einer Symbolrate von 50 Baud vorliegt, mittels eines Gold-Codes auf eine resultierende Bandbreite von 1,023 MHz (C/A-Aussendung) aufgespreizt. Beim sogenannten *protected code* (P-Code) erfolgt gar eine Spreizung auf 10,23 MHz [GPSEinf].

Ein *autorisierter* Empfänger, der die Spreizparameter, d.h. Polynome und Startwerte der Generatoren besitzt, kann durch Korrelieren des empfangenen Spread Spectrum Signales mit einer lokal erzeugten passenden Peudozufallsfolge den Nachrichteninhalt wieder regenerieren.

Alle anderen Empfänger können diesen Korrelationsgewinn nicht ausschöpfen, da sie die zur Korrelation notwendige PN-Folge lokal nicht erzeugen können. Sie können ggf. lediglich eine Erhöhung des Rauschpegels feststellen.

Ein wichtiger Parameter bei der Spread-Spectrum-Übertragung ist die Länge der Spreizfolgen selbst. In realen Systemen, wie die bereits erwähnten Radio-LANs werden längere Folgen vermieden, da der autorisierte Empfänger sich vor der eigentlichen Empfangsphase zunächst auf die Spreizfolge aufsynchronisieren muß.

Somit ergeben sich folgende Vorteile für Spread-Spectrum-Aussendungen:

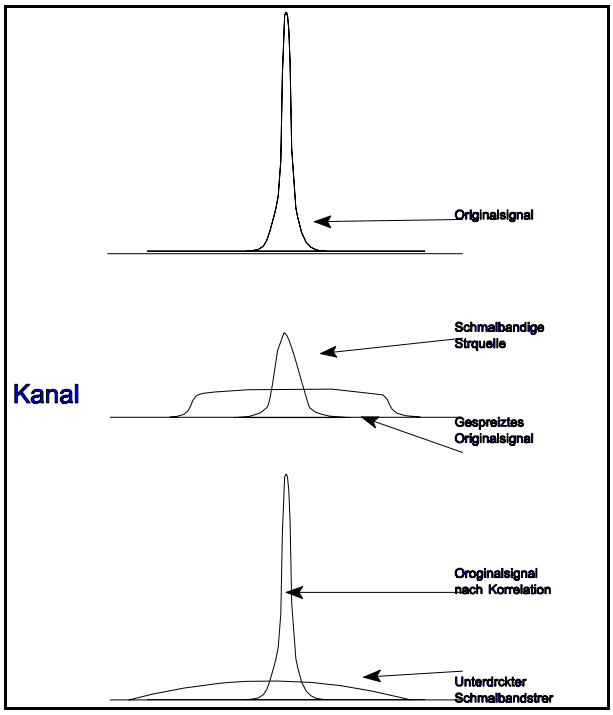

Abb. 2: Wirkung der Spreizung

- Verringerung der Störbarkeit
- Verbesserung bei Multipath-Effekten
- Mehrfach-Frequenznutzung (Codemultiplex)
- Maskierung von Aussendungen

Die Verringerung der Störbarkeit durch Schalbandsysteme ist eine direkte Folge der Korrelation.

Wenn ein gespreiztes Signal durch einen schmalbandigen Störer überlagert wird, so wird nur ein eher kleiner Teil der Nutzinformation vernichtet. Nach der Korellation auf der Empfangsseite wird der Störer, der ja nicht kohärent zum verwendteten PN-Signal ist in die Breite aufgespreizt und damit geschwächt. Das Kohärente Nutzsignal hingegen wird, bis auf einen Rest, wieder regeneriert.

Die Tatsache, daß nur zur PN-Folge kohärente Signale verstärkt werden erlaubt, mehrere gespreizte Signale im gleichen Frequenzbereich zu überlagern und an Hand der PN-Folge per Korrelation empfangsseitig wieder zu trennen. Dieses *Codemultiplex*-Verfahren wird wiederum beim GPS-System eingesetzt. Hier senden alle Satelliten im gleichen Frequenzbereich (F_0 = 1575,42 MHz). Die Aussendungen werden durch die 32 möglichen Gold-Codes getrennt.

2.2 Frequenzsprung-Signale

Im Gegensatz zu der oben diskutierten Spreizmodulation handelt es sich bei Frequenzsprungaussendungen (Freuqency Hopping) um frequenzagile Signale, bei denen die Mittenfrequenz in zeitlicher Folge umgeschaltet wird. Wir haben es hierbei also mit einem schmalbandig modulierten System zu tun, das seinen Bandbreitenbedarf durch die Frequenzwechsel begründet.

Die Frequenzwechsel können periodisch oder auch nicht-periodisch erfolgen, wobei der Frequenzwechsel meistens über einen Pseudo-Zufallsgenerator gesteuert wird. Der zugehörende Empfänger kann sich nun auf die Frequenzsprungfolge aufsynchronisieren und folgt dann dem Sender synchron von Frequenz zu Frequenz.

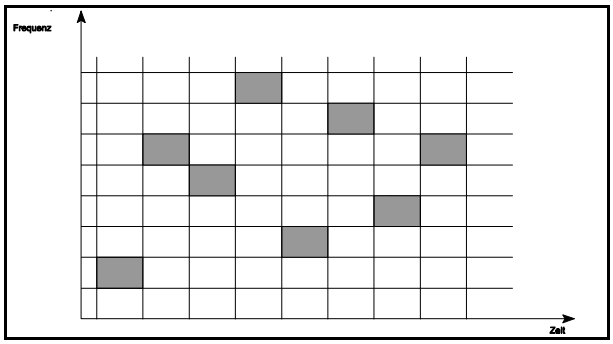

Abb. 3: Prinzip von Frequenzsprungsendungen

Die Sprungrate kann bei unterschiedlichen Systemen im Bereich von einigen wenigen bis zu mehreren tausend hops/sec variieren.

Die ersten Frequenzsprungsysteme wurden weltweit für hoheitliche Aufgaben im Bereich des Flug- und Mobilfunks entwickelt und haben inzwischen einen hohen technologischen Stand erreicht.

Neben militärischen Systemen wird Frequenzsprung inzwischen auch bei kommerziellen Systemen, beispielsweise bei drahtlosen Telefonen, den bereits erwähnten Radio-LAN-Systemen und bei Steuerungen in den verschiedenen ISM-Bereichen der Frequenzbänder eingesetzt.

Dabei wird die gleiche Information in aufeinanderfolgende Hops redundant ausgesendet um die Übertragungswahrscheinlichkeit zu steigern. Man kann vermuten, daß insbesondere die Reduktion der Störbarkeit das Motiv für den Einsatz von Frequenzspringern ist.

Gleichzeitig sind Frequenzspringer jedoch mit konventionellen Schmalbandempfängern zumindest teilweise zu erfassen. Da die Verweildauer eines Hoppers auf jeweils einer Frequenz verhältnismäßig groß ist und damit seine Energie im Kanal im Vergleich zu Spreizsystemen deutlich oberhalb der Rauschschwelle liegen muß, kann ein Hopper durch Knack-, Prassel- oder Summgeräusche in einem Schmalbandempfänger detektiert werden. Dies tritt immer dann auf, wenn ein Hop in den Nutzbereich des Schmalbandempfängers fällt.

Ein Abhören ist mit Schmalbandempfängern allerdings nicht sinnvoll möglich, da, wenn überhaupt nur ein einziger Kanal der Sprungfolge empfangen werden kann.

2.3 Andere frequenzagile Aussendungen

Als den wohl prominentesten Vertreter frequenzagiler Aussendungen im Kurzwellenbereich wollen wir uns nun mit den sogenannten Chirp-Soundern beschäftigen.

Chirp-Sounder sind weltweit operierende Systeme, die vor allem in der Ionosphärenforschung zur Bestimmung günstiger Übertragungsfrequenzen benutzt werden. Heute sind eine Vielzahl derartiger Systeme im Einsatz.

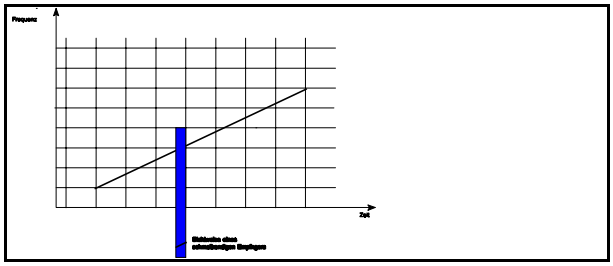

Abb. 4: Prinzip von Chirp-Soundern

Chirp-Sounder-Systeme bestehen aus einer Sendeeinrichtung und einem entfernten Empfänger. Im einfachsten Fall strahlt der Sender kontinuierlich ein konstantes, in der Regel unmoduliertes Signal aus und variiert die Sendefrequenz dabei kontinuierlich. Es entsteht somit ein mehr oder minder langer 'Chirp', der nun synchron von der entfernten Empfangseinrichtung aufgenommen und vermessen wird.

Aus der Auswertung kann der Empfänger nun seinerseits Rückschlüsse über das Dämpfungsverhalten der Ionosphäre als Funktion der Übertragungsfrequenz ziehen.

Er kann weiterhin durch Messung der Streckenlaufzeiten Informationen über Das Reflexionsverhalten der einzelnen Ionosphärenschichten ziehen. Wir haben es somit mit einer Art 'Wobbler' zu tun, der die Chrakteristika der Ionosphäre vermißt. Aus diesen Daten werden dann Prognosen und Funkwetterdaten abgeleitet.

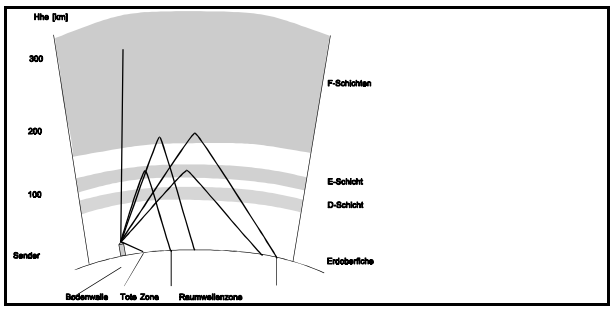

Abb. 5: Schichtung in der Ionosphäre

Jeder auf Kurzwelle aktive Amateur hat sicherlich bereits zahlreiche Chirp-Sounder gehört, obwohl es vielleicht vielen gar nicht bewußt ist. Im Schmalbandempfänger ist nämlich meist nur ein kurzes Trägersignal zu hören, das sich nicht wiederholt. Dies war der Moment, in dem der Chirp-Sounder am Empfänger 'vorbei gekommen' ist.

Ein breitbandiger Empfänger könnte den Chirp-Sounder als schräge Linie in der Frequenz-/Zeit-Ebene beobachten, wie dies aus der Abbildung ersichtlich ist.

Nun gibt es in der Praxis verschiedene Typen von Chirp-Soundern. Die einfachsten verhalten sich wie oben beschrieben, ähnlich wie der Generator eines Wobblers. Hierbei können die unterschiedlichsten Abtastgeschwindigkeiten beobachtet werden.

Modernere Typen überspringen Festsender im Abtastbereich, vermutlich um Beschwerden von Betreibern anderer Funkdienste, beispielsweise von Rundfunkstationen zu vermeiden.

Wieder andere haben pro 'Kanal' eine höhere Sendedauer und springen in diskreten Schritten von Kanal zu Kanal. Sender dieser Art werden in der Literatur anschaulich auch als Stepper bezeichnet.

3 Anforderungen und Konzepte

Bereits aus den vorangegangenen Beispielen wird klar, daß breitbandige Emmisionen mit konventionellen Schmalbandempfängern nicht oder nur unzureichend erfaßbar sind. Wie aber müßte nun ein Empfänger beschaffen sein, um derartige Breitband-Aussendungen empfangen zu können.

Im wesentlichen müssen folgende Aufgaben erfüllt werden:

- breitbandige Energiedetektion
- Signalverfolgung und -aufnahme

Hinzu kommen gegebenenfalls weitere Analysefunktionen zur Erkennung des jeweiligen Verfahrens. Auf diese soll an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden.

Zur Erfüllung der oben genannten Aufgaben sind prinzipiell zwei Verfahren möglich, nämlich

- Abtastempfänger (Scanner)
- Vielkanalempfänger

Die Verfahren unterscheiden sich jedoch deutlich in ihrer Wirksamkeit und dem notwendigen Aufwand.

Bei den bereits altbekannten *Scannern* wird vom Empfänger zunächst nur ein Frequenzausschnitt geringer Breite aufgenommen. Dieser schmalbandige Ausschnitt wird dann wie ein Fenster periodisch über den zu untersuchenden Frequenzbereich verschoben.

Die Geschwindigkeit, mit der der Ausschnitt über den Frequenzbereich verschoben wird sowie das Verhältnis zwischen dem Frequenzausschnitt und dem Gesamtbereich, bestimmt die Wahrscheinlichkeit, mit der auftretende Signale im Überwachungsbereich erkannt werden können.

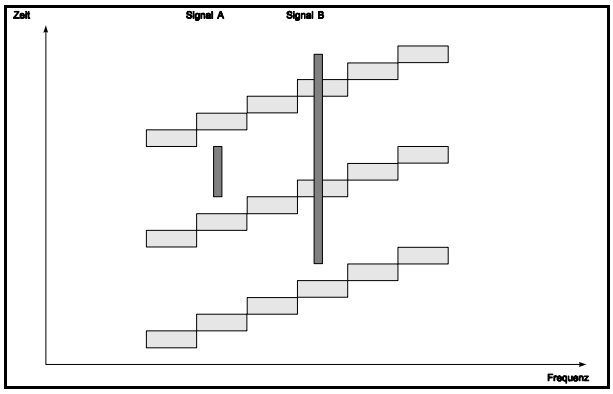

Abb. 6: Prinzip des Abtastempfängers

Abtastempfänger können in den HF-Stufen und der Signalverarbeitung konventioneller Analogtechnik realisiert werden. Im Amateurbereich waren immer einige wenige sogenannte 'Panoramaempfänger' kommerziell verfügbar.

Moderne Empfänger sind heute in der Lage Frequenzausschnitte von wenigen 100 kHz bei Abtastgeschwindigkeiten von 250 MHz/s abzusuchen. Langsame Empfänger mit Scanner-Funktionen im Millisekunden- oder gar Sekundenbereich sind für Detektionszwecke breitbandiger Kurzzeit-Emitter eigenlich ungeeignet.

Diese hohen Scan-Geschwindigkeiten sind notwendig, damit eine Chance besteht, Frequenzspringer oder Chirp-Sounder überhaupt zu erkennen. Die Abtastung muß weiterhin periodisch erfolgen.

Die Überwachung von Festfrequenzaussendungen mit langen Sendeintervallen stellt für einen Scanner in der Regel kein Problem dar.

Ist der zu beobachtende Sender hingegen nur kurzzeitig aktiv, so besteht die Gefahr, daß ein Scanner dieses Signal in seinem Abtaszyklus verpaßt und somit übersieht. Dieser Fall tritt insbesondere bei Burst-Aussendungen und nicht-periodischen Paketfunkaussendungen auf. Aber auch die Erkennung von Frequenzspringern kann in der Praxis bereits empfindlich eingeschränkt sein.

Hinzu kommt, daß Scanner-Empfänger aufgrund ihres Funktionsprinzips nicht in der Lage sind, erfaßte Signale kontinuierlich auszugeben, da sie periodisch ihre Empfangsfrequenz verschieben müssen, um ihren Suchauftrag erfüllen zu können. Deshalb können Scanner in Auswerteautomaten, die der kontinuierlichen Beobachtung von Signalen dienen, nur in Verbindung mit externen Abhängeempfängern eingesetzt werden, was den Gesamtaufwand für eine Anlage, die diesen Empfängertyp benutzt erhöhen kann.

Echte *Vielkanalempfänger* hingegen überwachen alle Frequenzlinien eines breiteren Frequenzbereiches quasi gleichzeitig. Als Modell könnte man sich diese Art von Breitbandempfängern als aus einer Vielzahl paralleler Einzelempfänger aufgebaut denken, von denen jeder eine einzelne Frequenzlinie überwacht.

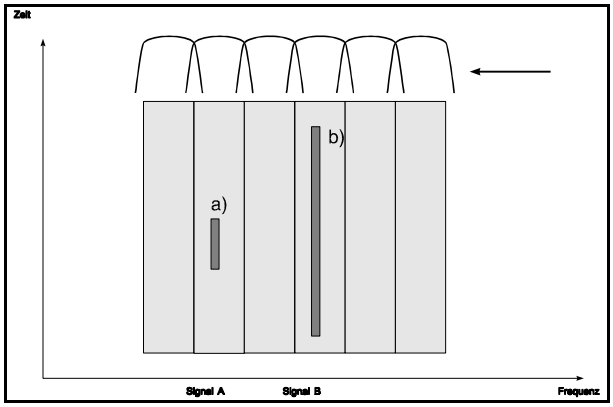

Abb. 7: Vielkanalempfänger

In der Praxis ist eine derartige Realisierung mit diskreten Einzelempfängern aus technischen und wirtschaftlichen Gründen jedoch nicht sinnvoll.

Moderne Systeme verwenden vielmehr Verfahren der digitalen Signalverarbeitung wie die schnelle Fourier-Transformation (FFT) in Verbindung mit ebenfalls digital realisierten Filter- und Fensterfunktionen.

Das Prinzip der Fourier-Transformation ist eines der grundlegenden Verfahren in der Technik der Nachrichtenübertragung. Sie erlaubt die Transformation von Zeitfunktionen, wie beispielsweise bei der Beschreibung von Signalen deren Energie als Funktion der Zeit x(t) angegeben wird, in sogenannte Spektralfunktionen X(f), bei denen der Energiegehalt als Funktion der Frequenz angegeben wird. Die Fourier-Transformation ist dabei symmetrisch.

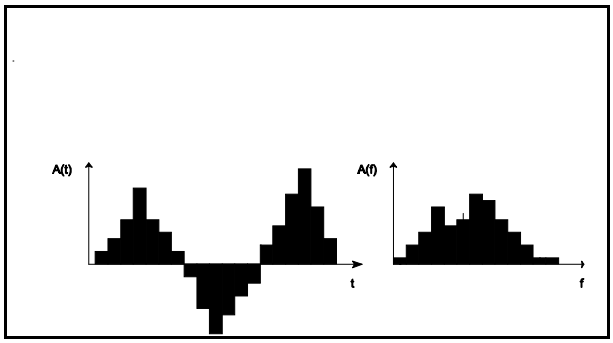

Abb. 8: Transformation Zeit->Frequenz

Dadurch kann jeder Zeitfunktion in eindeutiger Weise eine Frequenzfunktion zugeordnet werden *und umgekehrt*. Für die Verarbeitung in Rechnern wurden spezielle Abarten, nämlich die 'diskrete' Fourier-Funktion und ihre schnelle Variante, die Fast Fourier Transformation (FFT) entwickelt. Sie gehören heute zum Standardrepertoire der Nachrichtenübertragung.

Wenn wir nun ein analoges Signal von einem breitbandigen Eingangsteil abtasten, so kann man die zeitliche Folge der so entstehenden Abtastwerte als diskrete Zeitfunktion auffassen.

Eine passende Anzahl von Abtastwerten, d.h. ein passender Ausschnitt aus der Zeitfunktion kann nun gespeichert werden und quasi en bloc in die Frequenzlage transformiert werden. Das Ergebnis beschreibt nun die Energieinhalte einzelner Signalanteile als Funktion der Frequenz.

Wir haben somit eine Art von Spektrum-Analysator, der jedoch nicht die Signalanteile durch Scannen bestimmt, sondern wir haben quasi eine Momentaufnahme des Spektrums, das zu dem zischengespeicherten Zeitsignal gehört.

Abb. 9: Energiedetektion in Frequenzbereich

Wenn es nun gelingt, diese Abtastungen mit anschließender Transformationen immer und immer wieder lückenlos durchzuführen, dann erhalten wir am Ausgang dieser Einrichtung eine lückenlose Folge von Momentanaufnahmen der Energieverteilung über die Frequenz.

Aufgrund der Fortschritte bei den digitalen Signalverarbeitungstechniken bieten FFT-basierende Empfangssysteme derzeit das beste Verhältnis zwischen Suchgeschwindigkeit, Auffaßwahrscheinlichkeit einerseits und dem Realisierungsaufwand andererseits (Vgl. [Grabau1]).

Allerdings ist für die on-line-Verarbeitung insbesondere bei großen Überwachungsbandbreiten ein erheblicher Rechenaufwand notwendig.

Auch sind weitere Probleme zu lösen. Die Anwendung der Fourier-Transformation auf Ausschnitte aus einem Zeitsignal ist eigentlich garnicht zulässig. Dieser Umstand wird durch die sogenannte Fensterung zumindest teilweise behoben. Hierzu gibt es in der Nachrichtentheorie und der einschlägigen Literatur umfassende Informationen.

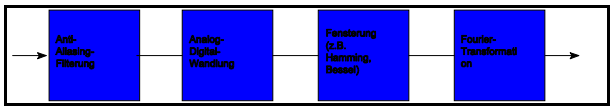

Abb. 10: Prinzipaufbau eines FFT-Analyseteils

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Festlegung der FFT-Länge, d.h. der Anzahl der diskreten Abtastwerte, die in die Transformation einbezogen werden sollen. So steigt mit wachsender FFT-Länge die Anzahl der resultierenden Frequenzlinien und damit die 'Genauigkeit' bzw. die Auflösung auf der Frequenzachse.

Wie leicht zu erkennen ist, erhält man im Gegenzug jedoch eine Art der zeitlichen Unschärfe, da mehr Abtastwerte in den Prozess mit einbezogen werden. Ist das empfangene Signal nun moduliert, so können unter Umständen ein oder mehrere Symbolwechsel in die Größenordnung der FFT-Länge kommen. Da aber nun die FFT den Block integral verarbeitet, gehen schnelle Signaländerungen verloren bzw. können nachfolgend nicht mehr getrennt werden.

Weitere Problemkreise liegen in der analogen Vorverarbeitung, an die besonders bei wirklich breitbandigen Systemen erhebliche Anforderungen an Linearität und Intermodulationsabstände gestellt wird. Desweiteren muß das Problem der Systemdynamik gelöst werden. Die Dynamik hängt dabei zum einen von der Quantisierungsbreite des Analog-Digitalwandlers ab, wird jedoch auch in nicht unerheblichem Maße durch die Einflüsse der FFT-Länge bestimmt.

4 Ausblick

Bei den zu erwartenden Fortschritten auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung werden in Zukunft verstärkt automatische Systeme die Aufgaben der Funküberwachung übernehmen. Insbesondere die Verfügbarkeit schneller Signalprozessoren wird es erlauben Emissionen zu erkennen, die mit konventioneller Analogtechnik nicht durchgeführt werden können.

Die zunehmende Digitalisierung und die Tatsache, daß viele Aufgaben von Software gelöst werden können bietet jedoch auch die Chance, hier eigene Experimente durchzuführen.

Anhang A: Abkürzungen

A/D	Analog-/Digital (-Wandlung)
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum. Breitband-Signalspreizung auf Basis von digitalen Pseudozufalls-Folgen
FFT	Fast Fourier Transformation. Verfahren der Transformation von Zeitsignalen in den Frequenzbereich
FH	Frequency Hopping. Frequenzspringen
HF	High Frequency. Hochfrequenz, wird auch als Synonym für Kurzwellen-Frequenzbereich von ca. 1 MHz bis 30 MHz benutzt

ISM Industrial Scientific and Medical (Applications). Systeme für vorgenannte Zwecke, die genehmigungsfrei auf bestimmten eingeschränkten Frequenzbereichen betrieben werden dürfen.

LPI Low Propability of Intercept. Bezeichnet Signale, die aufgrund ihres Charakters eine geringe Aufklärungswahrscheinlichkeit besitzen

LUF Lowest Usable Frequency. Niederste Frequenz, mit der zu einer gegebenen Zeit eine Kurzwellen-Fernverbindung über Raumwelle zwischen zwei gegebenen Orten möglich ist.

MUF Maximum Usable Frequency. Höchste Frequenz, mit der zu einer gegebenen Zeit eine Kurzwellen-Fernverbindung über Raumwelle zwischen zwei gegebenen Orten möglich ist.

VHF Very High Frequency. Wird häufig synonym für Frequenzen zwischen 30 MHz und 200 MHz benutzt

Anhang B: Literatur

[Braun] Braun, Gerhard, "Planung und Berechnung von Kurzwellenverbindungen". Siemens AG, München. ISBN 3-8009-1442-5

[DigMod] Franke, Erich H., "Digitale Modulationsverfahren auf Kurzwelle und anderswpo". Skriptum zum Vortrag auf der 40. UKW-Tagung, 1995, Weinheim.

[Grabau1] Grabau, Rudolf, "Funküberwachung und Elektronische Kampfführung". Franck'h, Stuttgart. ISBN 3-440-05667-8

[Grabau2] Grabau, Rudolf, Pfaff, Klaus [Hrsg.]. "Funkpeiltechnik". Franck'h, Stuttgart. ISBN 3-440-05991-X

[GPSEinf] Franke, Erich H., "Das GPS-Satellitensystem. Eine Einführung", Skriptum zum Vortrag auf der 37. UKW-Tagung, 1992, Weinheim

[Knuth] Knuth, Donald, "The Art of Computer Programming". Vol. 2 "Seminumerical Algorithms" Addison Wesley. ISBN 0-201-03822-6